

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

09/402112

PCT/JP98/01278

日 本 国 特 許 庁

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

24.03.98

2

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

REC'D 15 MAY 1998

WIPO PCT

出 願 年 月 日

Date of Application:

1997年 3月29日

出 願 番 号

Application Number:

平成 9年特許願第114951号

出 願 人

Applicant (s):

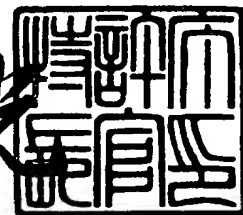
川上 彰二郎

PRIORITY DOCUMENT

1998年 4月24日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

荒井 寿光



出証番号 出証特平10-3031901

【書類名】 特許願

【整理番号】 3D-PBS

【提出日】 平成 9年 3月29日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G02B 1/00

G02B 26/00

G02F 1/01

G02F 1/015

G02F 1/025

【発明の名称】 3次元周期構造体

【請求項の数】 6

【発明者】

【住所又は居所】 宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋マンション
ファラオC-09

【氏名】 川上 彰二郎

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市緑区加賀原1丁目41番5号

【氏名】 榊 裕之

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県北葛飾郡鷺宮町西大輪868番地

【氏名】 白石 和男

【特許出願人】

【識別番号】 391006566

【郵便番号】 984

【住所又は居所】 宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋マンション
ファラオC-09

【氏名又は名称】 川上 彰二郎

【電話番号】 022(223)4883

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【書類名】 明細書

【発明の名称】 3次元周期構造体

【特許請求の範囲】

【請求項1】 2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ基板の上に2種類以上の物質をほぼ周期的に順次積層し、その積層の中の少なくとも一部分にスパッタエッチングを単独で、または成膜と同時に用いることにより3次元的にほぼ周期的な構造体を形成する作製方法、および当該構造体。

【請求項2】 2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状物質をほぼ周期的に順次積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体の少なくともその一部分において、または2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ1種類の膜状物質をほぼ周期的に積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体の膜の界面において、光学的分極率が非線形性をもつ物質、または電気光学材料、または透明体、または導電性物質を含むもの。

【請求項3】 2種類以上の透明体よりなる、請求項1の方法により作成された3次元的にほぼ周期的な構造体の少なくともその一部分において、発光性あるいは光増幅性物質を含むもの。

【請求項4】 2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質をほぼ周期的に順次積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体の内部に、導波路あるいは共振器あるいは分岐器あるいは結合器あるいは反射器、または受光器を含むもの。

【請求項5】 2種類以上の透明体よりなる、請求項1の方法により作成された3次元的にほぼ周期的な構造体の内部に、半導体レーザを含むもの。

【請求項6】 基板の上の直交するx軸、y軸を対称軸とした2次元的に周期的な凹凸をもつ基板の上に共通の周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質を周期的に順次積層した構造をもち、光学的に2軸異方性を示すことを特徴とする透明3次元構造体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】

本発明は、光波回路素子として用いられる3次元的にほぼ周期的な屈折率分布を持つ構造、およびその製造方法と応用技術・応用デバイスにわたるジェネリックな（包括生成的な）技術に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

物質内において周期が $1\mu\text{m}$ 程度ないしそれ以下の3次元周期構造を作製する技術は光技術・電子技術分野において潜在的な応用範囲は広い。

しかしながら、その作製方法はまだ開発されていないため、周期が $1\mu\text{m}$ 程度ないしそれ以下の3次元周期構造は実現されるに至っておらず、これまで次に挙げる2種のものが検討されただけである。（1）第2図に示すような、3方向からドライエッチングで穴を形成するもの（E. Yablono vitch, "Photonic band-gap structures", J. Opt. Soc. Am. B, vol. 10, no. 2, pp. 283-295, 1993）。

（2）第3図に示すような、すだれ状の基板を対向・ボンディングし、選択エッチングで基板の一方を除去し、再び対向・ボンディングさせる、という操作を繰り返すもの（S. Noda, N. Yamamoto, and Asasaki, "New realization method for three-dimensional photonic crystal in optical wavelength region", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 35, pp. L909-L912, 1996）。これら2種の概念は、周期が $1\mu\text{m}$ 程度ないしそれ以下のものは現在まで実現されていない。

【0003】

【発明が解決しようとする問題点】

前項（1）の方法では、1～2周期以上の加工は不可能であるという問題点がある。また、前項（2）の方法では、選択化学エッチングやボンディングという制御性の低い手工業プロセスに多数回頼るため、再現性・生産性が低いという問題点がある。

【0004】

本発明は、上記従来技術の課題を解決すべくなされたものであり、周期が $1\mu\text{m}$

m程度ないしそれ以下の3次元周期構造体とその応用部品・デバイスを提供すること、および、それらの作製方法を提供することが目的である。

【0005】

【問題点を解決するための手段】

上記目的を達成するためには、信頼度・再現性にすぐれた方法で3次元的にほぼ周期的な構造体を実現することが必要である。このためには、2種類以上の物質をほぼ周期的に順次積層し、その積層の中の少なくとも一部分にスパッタエッチングを単独で、または成膜と同時に用いる方法が有効である。この方法によって、周期が1 μm 程度ないしそれ以下の3次元周期構造体を作製することができる。

【0006】

【作用】

前項の手段によって3次元周期構造体を構成すれば、周期が1 μm 程度ないしそれ以下のものが簡便に再現性よく実現できる。また、光学的分極率が非線形性をもつ物質、または発光性あるいは光増幅性物質、または電気光学材料、または透明体、または導電性物質などを周期構造の中に取り込むことができ、さらに、導波路あるいは共振器あるいは分岐器あるいは結合器あるいは反射器、または半導体レーザ、または受光器などを周期構造中に作り込むことができるため、3次元周期構造体の応用部品・デバイスを信頼度・再現性にすぐれた方法で作製することができる。

本発明は共通の根幹から発して多様な発展を内包するジェネリック（包括生成的）なものであり、このことはこれに続く実施例を通じて明示される。

【0007】

【実施例】

【実施例1】

はじめに薄膜の形成・エッチングについて、本発明で述べているもの、本発明に適用可能なもののいくつかを概略説明する。

図4にはスパッタリング成膜の原理図を示す。放電空間内に薄膜の原料物質の供給源であるターゲットをおく。気体イオンがターゲットに入射してターゲット

物質を飛散させる（実線矢印）。その飛散した物質粒子は、放電空間に隣接する基板に到着・付着する（破線矢印）。図5には真空蒸着法の概念を示す。抵抗加熱ないし電子ビーム加熱された蒸着源から原料物質が真空中に蒸散し、基板に到着・付着する。図6にはレーザアブレーション法の概念を示す。大出力のパルスレーザ光を原料物質に入射させることにより原料物質の一部分を瞬間的に加熱・蒸散させ、基板に到着・付着させる。

【0008】

また、本発明において膜を整形する役割をもつスパッタエッチングについて図7によって説明する。基板を放電空間において気体イオンを入射させる。これは逆スパッタと呼ばれる。そのとき基板表面の物質がエッチング除去される。単位時間にエッチングされる面が法線方向に後退する割合を面の傾き θ の関数として定義し、エッチング率という。エッチング率 $E(\theta)$ は多くの物質に対し図8に示す性質をもつ。すなわち 0° と 90° の間にある角 θ_m で最大でそれを境に左右両方向に単調に減少する。このスパッタエッチングは、前述のスパッタリング成膜、真空蒸着、レーザアブレーションの前または後に実行することができる。またスパッタエッチングと別種の成膜を同時に進行させることもできる。例えば、スパッタリングによる成膜とスパッタエッチングとを同時に進行させる同時プロセスをバイアススパッタリングと呼ぶ。

【0009】

3次元周期構造体形成の一例を述べる。溶融石英基板上に、電子ビームリソグラフィおよびドライエッチング法により、周期的な孔の列を形成する。または基板上に膜を形成しその膜に孔の列を形成してもよく、それをふくめて基板という。その上にSiおよび SiO_2 を高周波スパッタリング法により堆積し、その中の SiO_2 の積層の一部分には、高周波により電離したイオンが基板表面に入射してエッチングを行う作用、即ちスパッタエッチングと、高周波スパッタリングによる積層を同時に進行させる。スパッタエッチングの整形作用を利用しているので、Siおよび SiO_2 を多数周期積層しても基板上の2次元周期形状は失われず、数十周期の積層を行って表面の周期構造は安定であることが原子間力顕微鏡観察で確認されている。内部は図1（具体的には図10）に示すとおり3次

元の周期性の高い構造を形成している。本例において、 S_i は当初アモルファス物質として堆積されるが、イオン衝撃の効果および加熱によって S_i を微結晶化させることができる。

【0010】

もう一つの構造の作製方法を説明しておく。図1により説明した方法においては2種類の物質が同程度の厚さをもつが、後述するように別種の機能性材料（ゲスト）を、構造を形成する単一主成分（ホスト）の凹凸表面に、ホストよりはるかに薄く積層し周期を繰り返すことが可能である。即ち、仮にゲストを導入しなければホストは結果的に均一の構造を持つ。換言すれば、均一なホスト材料の間に、ゲストの3次元周期構造を埋め込んだ構造を作製することができる。ホストを2種類以上の物質の、ゲストより厚い膜の周期構造体とするホスト・ゲスト型3次元周期構造体の形成も同様にしてなされる。なお、図1に即して説明すると、物質Aの表面とBの表面とがすべて同一であれば問題なく、仮にAの表面とBの表面が一致しなくとも異なる層の間でAどうし、Bどうしが同形をもてば周期性が保たれる。

【0011】

【実施例2】

透明体からなる、媒質内光波長の半分内外の周期をもつ3次元の周期構造については、フォトリック・バンドギャップという効果が理論上予言され、マイクロ波帯（例えば波長3cm帯）のモデル実験で理論が検証されている。3次元周期構造について説明するため、図9に3次元周期構造の概念を示す。3次元周期構造は、屈折率 n_1 、 n_2 ($n_1 > n_2$) をもつ厚さ d_1 、 d_2 の透明体5、6から構成され、 x 、 y 、 z 方向にそれぞれ周期 $x_1 + x_2$ 、 $y_1 + y_2$ 、 $z_1 + z_2$ をもつ。簡単のために $x_1 + x_2$ 、 $y_1 + y_2$ とともに $z_1 + z_2$ より十分大きく (z_1 、 z_2 は d_1 、 d_2 と同じ意味である)、

【数1】

$$n_1 d_1 = n_2 d_2$$

を満たすと仮定する。 z 方向に進む波は以下説明する性質をもつ。ある自由空間波長 λ_0 を中心とする光の波長範囲

【数2】

$$\lambda_l < \lambda < \lambda_u$$

において、+z方向に進む光波は進行するに伴って振幅が指数的に減少し、伝搬することができない。-z方向にも同様である。 λ_0 の満たす条件は、

【数3】

$$\frac{\lambda_0}{4} = n_1 d_1 (= n_2 d_2)$$

であり、

【数4】

$$\frac{1}{\lambda_l} = \frac{4}{\pi \lambda_0} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \right)$$

【数5】

$$\frac{1}{\lambda_u} = \frac{4}{\pi \lambda_0} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n_2}{n_1}} \right)$$

である。

n_2/n_1 が1に近いときは

【数6】

$$\frac{\lambda_u - \lambda_l}{\lambda_0} \sim \frac{4}{\pi} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$$

(λ_0 は λ_u 、 λ_l のほぼ中心)

で与えられる。この現象をBragg遮断という。遮断の中心波長は周期の長さに比例する。遮断の生ずる波長域の幅は n_1 と n_2 とがほぼ一致するとき0に近づき、 n_1 と n_2 の比が大きくなるとき幅は λ_0 の数分の一のオーダーとなる。ゆえに、いわゆるBragg波長 λ_0 からある程度離れた波長の光も n_1/n_2 の比が十分大きいと遮断される。構成材料をa-Si(屈折率3.26)およびSiO₂(屈折率1.46)とする。この材料系で上式により $1/\lambda_l$ 、 $1/\lambda_u$ を求めるとそれぞれ $1/\lambda_0$ から25%減、25%増となる。

また、Siを結晶化し、HF水溶液によって、Siを残してSiO₂を溶かし去ることができる。そのあとを例えば空気で満たすとき、この構造において屈折

率比は3.4:1になり、同様に $1/\lambda_1$ 、 $1/\lambda_u$ は $1/\lambda_0$ から36%減、36%増となる。

3次元周期構造において、任意の方向に向う波は一般に立体角方向ごとに異なる周期を見るので、それぞれの方向ごとの遮断波長帯をもつ。特定の自由空間波長 λ_s をもつ光が、その3次元周期構造内のすべての立体的な方向に関して遮断波長帯に共通に含まれるならば、波長 λ_s の光をその3次元周期構造の中に完全に閉じ込めることができる。

【0012】

一例として図10に示すように周期構造を形成した。方向x, y, zに対する周期はそれぞれ $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.2\mu\text{m}$ となる。材料系はa-Siおよび SiO_2 である。数十周期にわたる周期性が確認された。

具体的に示すならば、xy面内に六方対称、z方向に周期的な構造ではいわゆるブリュアン域は一例として図11に示す形をとる。波数の原点は六角柱の中心である。比 n_1/n_2 が十分大きいと、考えている波長 λ_s がブリュアン域の表面全体において遮断域に共通に含まれ波が一切放射しない。それより n_1/n_2 が小さくなると例えば図の白い部分を除く表面に対し λ_s は遮断域に共通に含まれ、後に示すように多くの応用には十分である。

すなわち六角柱の中心から、斜線を施した領域内の一点へ向かう方向の放射波は抑圧され遮断される。

【0013】

また、本例においても本出願全体でも「周期構造」という語を用いているが、勿論出願全体を通じて、周期性が厳密に成り立っていることに限定されない。作成条件の小さい変化による乱れは影響が小さく、あるいは意図的に周期性をわずかに乱すことにより次のような効果を生むことができる。

図12に示すように、基板上の周期孔を1個または数個を省いて基板を作製し、その上に SiO_2/Si の周期構造を実施例1のごとく形成すれば、周期性の乱れた部分が基板に垂直な方向に線状に形作られる。このような領域に沿って光波を伝搬させることができるので、放射の禁止された特異な空間と外部の空間とを結ぶ光の取り出し口・導入口とすることができる。ゆえに周期構造中のこのよ

うな乱れは有用である。

同様に3次元フォトリックバンドギャップ構造中の点状ないし有限長の線状の乱れ、ループ状の乱れは共振器の動作を行う。

図13には、積層方向および基板面内で、周期を空間的に三つの軸方向ともにゆるやかに変化させて実施例1の方法により形作った3次元フォトリックバンドギャップ構造を示す。3次元フォトリックバンドギャップ構造内の特定の方向をもつ光に関し、Bragg遮断条件を満たす周期の部分が空間内の適当な位置において存在するので、光はその領域で折り返すことになり、広い波長域、広い立体角範囲にフォトリックバンドギャップ構造特性が保証される。x, y方向には変調なく、z方向のみに周期を変調するなどの拡張も勿論可能である。

【0014】

[実施例3]

本実施例は3次元フォトリックバンドギャップ構造において、光を外部との間で出し入れする導波路や内部で波長を選択する共振器、分岐器などの回路素子の作製方法に関するものである。さきに図12で説明した通り光を積層面に直角をなす方向に出し入れすることができる。また、図14は直角格子状の回路素子の形成方法を説明している。石英基板上に図15に示す如く孔の列を形成する。ここで、線 $\Gamma_1 \Gamma_2$ に沿ってx方向の周期にずれを与える。その上にSi/SiO₂を実施例1のプロセスにより積層する。積層を十分な数繰り返したのち、面 $\Sigma_1 \Sigma_2 \Sigma_3$ において積層の厚さ方向に図14に示すずれを与える。この方法により光のパワーを線 $O_1 O_2$ の近くに局在させ、 $O_1 O_2$ に沿って伝搬させることができる。

この構造において次のことが生ずる。面 $\Gamma_1 \Gamma_2 \Gamma_3$ のずれにより、光は $\Gamma_1 \Gamma_2 \Gamma_3$ から左方にも右方にも、遠ざかるにつれ振幅が指数的に減少するので波は $\Gamma_1 \Gamma_2 \Gamma_3$ に沿い局在する。また $\Sigma_1 \Sigma_2 \Sigma_3$ のずれにより光は $\Sigma_1 \Sigma_2 \Sigma_3$ から上方にも下方にも遠ざかるにつれ振幅が指数的に減少する。その両方の作用により波は $O_1 O_2$ に沿い局在し、その方向に伝搬が生ずる。

【0015】

周期性のずれを用いる伝搬路の形成とは別に、屈折率の異なる部分の導入によ

る伝搬路の形成が可能である。図16には図1に示した Si/SiO_2 3次元周期構造の作製中の、 SiO_2 が積層された状態の、 xz 断面を示す。 x 方向に1周期ないし数周期の幅 AA' を除く両面にフォトリソグラフィにより設け、ストリップ状の開口 AA' からドライエッチングにより SiO_2 を一部除去する。これを点線で示す。そこへ Si をスパッタリングにより埋め戻し、ほぼ原表面に復した後、レジストをリフトオフ法により除去する。この操作によって表面凹凸の周期構造を保ち、その上に実施例1に従って z 方向に多数回成膜を続ける。なお上記のプロセスにおいて、断面の x 方向周期性を甚しく損なわない範囲で、 SiO_2 のドライエッチング操作を省略すること、または Si による埋め戻し操作を省略することも可能である。

【0016】

この作製法により光を波長選択性共振、分岐、結合、反射させることができる。これらの回路では放射が抑圧されている、ないし放射が生ずる方向が限定されているため放射損失が減少し、従来の光回路では過大な放射損失のため実現出来なかった構成が可能になっている。即ち、図11の例で云うと、考えている回路素子から強く放射の生じ得る方向を斜線部がおおっていれば放射損失を防止できる。上面からの透視図でそれぞれの回路を以下表す。

図17においては、入射導波路Aからの光波はB、Cに分岐される。

図18には三様の共振器を例示している。共振器B上に光波が定在波を形成する条件をみたす波長の近傍においてAからの光波はCに透過し、それ以外では波は反射される。共振器Eは導波路Dとのみ結合する。共振条件外ではDから入った波は内部損失の分を除けば全部反射される。共振条件下では内部蓄積エネルギー、損失（材料損失と残留放射損失）ともに増加するので反射係数は低下する。リング状の共振器G上で光の波長が丁度定在波条件をみたす時FからHへの透過が生ずる。

図19では、導波路ABとCDが局部的に近接し、その部分で両者の横方向に指数的に減少する波が重なり合い、二つの導波路の間のパワーのやりとり、即ち結合を生ずる。

図20では、A、Bの間に幅の狭くなった部分をおき波を部分反射させる回路

、C、Dの間に短い側路をおき波を部分反射させる回路を示している。

また、屈折率の異なる部分を形成するためには図16と同じくリソグラフィによってマスクを形成した後、イオン注入法を利用することができ、従って導波路、共振器、分岐器、結合器、反射器などを形成することができる。

【0017】

放射の抑圧された構造(PBS, Photonic Bandgap Structure)において光回路の接続が飛躍的に自由になる効果を図21を参照しつつ例示・説明する。導波路INにより左方から入射した光は分岐器BRにより上下に別れた路をとる。下方の枝を通る光は共振器R2を経て透過、またはR2で反射する。透過する波は結合器Cへ向かう。上方の枝を通る成分は同様に振る舞い、透過する成分は結合器Cへ向かって、並行する導波路に結合する。合波された信号波はREFで示す反射器で一部は反射され、一部は出力端OUTに向かう。

このような操作を通常の光集積回路で行なうことは、過大な放射損失のため実際は不可能であるが、PBSの中では電気回路を接続するのと同様に実行することができ、光回路の設計の自由度が飛躍的に増大する。

【0018】

[実施例4]

本発明において、3次元周期構造を形成する過程において生ずる表面2次元凹凸周期構造の、凹み部または凸起部に選択的に機能物質を導入する方法を以下説明する。積層においても、エッチングにおいても、山部、谷部それぞれをより多く積層ないしエッチする効果がそれぞれ存在することを示そう。図22には凹凸のある基板に原料物質の粒子が入射する様子を示す。基板に到来し、付着しないで反跳する粒子が基板に再到着・付着する効果は凹部において多い。即ち、原料物質の粒子が反跳する現象は凹部に選択的に堆積する効果をもつ。また、付着した粒子は熱エネルギーにより基板表面を動き回ることができる。これはマイグレーションと呼ばれる。マイグレーションにおいては、平均的に温度の高い部分から低い部分へ、吹き寄せられるように粒子の移動が生ずる。基板上では通常凹部が凸部より温度が高く、凹部から凸部への移動が生ずる。スパッタエッチングにお

いても同様に凹部が多くエッチされる機構、逆に凸部がより多くエッチされる機構が存在する。

気体イオンによるスパッタエッチングにおいても反跳イオンは存在し、反跳イオンは凸部より凹部をより多く侵食する。一方、以前に図8で説明した通り、水平面より傾斜部はより深くエッチされるので、もし表面が図23の形をしていれば谷部がよく深く、表面が図24の形をしていれば山部がより深くエッチされる。

以上を要約すると、成膜条件、スパッタエッチ条件、表面粒子の移動しやすさ、表面形状など諸条件の適切な選択によって堆積においては山部を厚くも谷部を厚くも製膜でき、エッチングについては山部を深くも谷部を深くも除去できる。

本発明において、パタン形成法が少なくとももう一つある。機能性ゲスト材料を山または谷の平坦部に堆積し傾斜部に堆積しないようにすることもできる。即ち、凹凸表面にゲスト材料をほぼ一様な厚さに堆積し、引き続きスパッタエッチすることにより、平坦部をより浅く、傾斜部をより深くエッチすることによりゲスト材料を傾斜部には残さず平坦部であるところの山頂と谷底とに残すことができる。

【0019】

図25は3次元の金属・絶縁物・金属トンネル接合とその作成法を説明するためのものである。実施例1のように、基板8（熔融石英）上に凹凸パタンを形成し、その凹部に金属15の領域を形成する。酸素を一時導入して15の表面を酸化し、さらに凸部に金属16の領域を形成する。但しA1は絶縁膜（アルミナ）を作るためにのみ用いて、金属A、BともにPt, W, Tiなどとすることも可能である。その上にSiO₂の凹凸パタンを形成し、以下繰り返すことにより、金属・絶縁物・金属トンネル接合の高密度3次元列を形成することができ、マイクロ波（ミリ波、サブミリ波を含む）の検出器として小型で高効率なデバイスを実現することが出来る。なお図25において、xy面上のパタンをy方向に引き伸ばされた線状またはすだれ状のパタンとして2次元化することが出来るのは云うまでもない。

【0020】

なおMIMのトンネル接合としては各横方向周期に対応して接合を作る（図26）の他に図27のように積層化させる方法や図28，29のような島状膜を用いてトンネル電流を流すこともできる。但し、図26や図27では金属膜が厚い場合、積層（z）方向で光が透過しないのでPBSとの組み合わせの仕方が制限される。例えば図30，31，32の形で用いる方法、あるいは積層させて、面に沿う方向に光を伝搬させる方式が可能である。

膜厚の薄い場合はこの種の制限がない。なお、MIMの利用法としては非線形のI-V特性を利用した、スイッチや検波・混合などへの応用と注入による発光を利用するもの（プラズモン発光）が可能である。非線形I-V特性等の電気特性によるスイッチング等の電子機能を用いるときは不透明の宿主材料を用いてもよい。

【0021】

〔実施例5〕

2種類以上の材料から構成される3次元周期構造体において、構成材料をSiCやSiなどの導電性材料とすることができる。その構造においてヘテロ接合受光器を形成するなど、電子素子とフォトリック・バンドギャップ効果を利用した光学素子を融合させた性質を持つデバイスを作製することができる。

【0022】

以下、より詳しく説明する。その準備として、機能材料（Fとする）又は機能単位（Functional Unit（FUとする））をPBG構造（PBS）に導入する方法を3つに分類する。

（イ）FUをPBS構造に囲まれる形（領域）に導入する方法（図30，31，32）

（ロ）PBSを構成する周期的に用いる物質（ SiO_2 やa-Si）の一部にFを挿入して用いる方法（図33）

（ハ）PBSを構成する周期的に用いる物質（ SiO_2 やSiなど）の一方を機能物質で構成する方法（図33）

上のいずれの形で用いるかによって半導体や金属の構造などの構成が変わる。以下に示す例では（イ）（ロ）（ハ）の諸例が示されている。

この場合、PBSを構成する2つの物質A、Bの構成法には下記の如く少なくとも4通りのものが考えられる。

	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4
物質A	半導体A	2種の半導体 A ₁ , A ₂ の複合膜	半導体A	A ₁ , A ₂ の複合膜
物質B	半導体B	半導体B	絶縁膜と半導体 Bの複合膜	絶縁膜

PBSを構成する材料をSiやSiCなどのようにすべて半導体にすると屈折率の差が小さくなるため、すべての方向に遮断帯またはある波長域における遮断特性を保つことは困難になるが、主軸方向に沿ってはバンギャップが維持される。この種の構造では積層方向に伝導性が得られるので、様々な新しい機能が達成できる。例えばp形、n形になるように各々の層を適当にドーピングすることにより、多重又は一対のpn構造が得られるので、整流性が得られ、逆バイアスを加えた状態ではpin検出器として利用でき、順バイアスされた接合では発光素子として利用できる。なお、PBSを構成する半導体A、Bにおいて一方又は双方を超薄膜の多層構造で構成すると、量子井戸や2重障壁構造などを作り込むことができる(タイプ2)。この場合、①共鳴トンネル効果に伴う負性抵抗特性や、②順方向にバイアスされた量子井戸では2次元電子・正孔の注入に伴う発光吸収・屈折率の変調効果、さらに③逆バイアスされた量子井戸に見られるシュタルク効果(電界に伴って吸収率や屈折率の変化する効果)が現れる。

さらに(タイプ3や4のように)、絶縁膜を使用した構造では積層方向に電流を流すのは困難となるが、量子井戸薄膜の効果や絶縁膜中に分散したシリコン超微粒子などの持つ注入発光などの光学的特性があらわれる。

【0023】

[実施例6]

本実施例では、光学的分極率が非線形性をもつ物質、あるいは非線形物質を媒質中に3次元周期的に配列した構造およびその作成方法とその効果を述べる。前記媒質は実施例2で説明した周期的な構造であっても良い。

説明の順序として、従来の技術を略述する。Cu, Au, Agなどの微粒子は非線形分極率をもつので、ガラス基板上に微粒を形成して、その上にレーザ光を

照射して高調波を発生させ得ることが知られている。この場合、高調波は、空間にランダムかつ平均的には一様に存在する微粒から発生するため基本波レーザ光と一定の位相関係をもたせることができない。

実施例1で説明した通り石英基板上に周期的凹凸を形成し、その上にスパッタエッチングを少なくとも一部分に含みつつ SiO_2 膜を堆積する。その上にCu, Au, Agなどの膜を堆積し、熱処理を行うと堆積時の跳ねかえり（反跳）により凸部より凹部により多く積層される。ただし成膜時の温度やイオン衝撃エネルギーによる粒子の表面移動の効果を利用して凸部により多く積層することもできる。これらの効果により2次元周期形状を呈する。

(1) その上に SiO_2 膜を形成して以下繰り返すことができる。この方法によれば均質な SiO_2 媒質中に非線形分極率をもつ物質が3次元周期的に配列する。故に、前述の方法で高調波を発生させたとき、配列要素間に一定の位相差が生じ、その干渉の結果、空間の特定な方向に高調波を効率よく放射させることができる。(2) その上にSi膜を形成し、(その上にCu, Au, Agなどの膜を形成してもよく、形成せず直ちにでもよく) その上に SiO_2 膜を形成し以下繰り返すことができる。この方法によれば、(1)の方法の効果に併せて、PBSの効果により高調波の放射の生ずる方向の数を一つにする、ないし(1)よりも制限することができるという効果がある。

【0024】

金属微粒子だけでなく、 LiNbO_3 , LiTaO_3 , KNbO_3 などのニオブ酸・タンタル酸系物質は非線形光学効果をもち、スパッタリング等により薄膜化が可能であるので、それを(1)ないし(2)の方法で3次元周期構造化して非線形特性を利用することができる。

あるいは図34に断面を示すように、凹凸をもつ SiO_2 の上に LiNbO_3 (または LiTaO_3 , KNbO_3 など)を薄くスパッタし、スパッタエッチングにより斜面部のみを除去して山部、谷部を残し、繰り返すことにより3次元周期構造を形成することもできる。

【0025】

[実施例7]

実施例6の(1)に書いたように、一様な第1のホスト透明体の中に第2の微小なゲスト透明体を3次元周期構造体として導入することができる。これは3次元の透過または反射回折格子として利用できる。ゲストは3次元的に分布するので、入射波からみたとき大きい回折断面積、即ち高い回折効率を得ることができる。

【0026】

[実施例8]

図35は発光・光増幅機能をもつ物質を含む3次元の周期構造体とその作成法を説明するためのものである。実施例1のように、石英基板上に凹凸パターンを形成し、その上に活性元素Erを含むSiO₂の領域を形成する。その上にSiの領域を形成する。その上にSiO₂の凹凸パターンを形成し、以下繰り返すことにより、発光・光増幅機能をもつ物質を含む3次元の周期構造体を形成することができる。

この系は光励起により1.5μm帯の光を発生・増幅することが出来る。ブラッグ遮断の効果により、励起されたErイオンが自発発光によりエネルギーを失う率が激減するので、光発生・増幅の効率が高まるという効果がある。なおSiO₂にY、Ndなどをドーピングすることができる。稀土類のほかに、CdSなど半導体の微結晶を実施例6のごとく成膜途中の2次元凹凸界面に導入することにより光発生・増幅を行なわせることが出来る。

【0027】

図36に示すように、物質14(SiO₂)の凹凸面の上にCdSやCdTeなどの微細結晶からなる超薄膜を形成し、スパッタエッチングにより斜面部のみを除去して山部、谷部を残し、そのうえに物質13(Si)を堆積する。この過程を繰り返して、SiO₂とSiからなるPBSの中に微細なCdSやCdTeなどの結晶群を3次元周期的に形成することが出来る。CdSやCdTeなどを励起すると光を放射することができるが、PBSの中の放射が遮断される方向には自発再結合発光がないので励起状態分子の利用効率が高い。

【0028】

[実施例9]

本実施例では、電気光学効果をもつ物質を3次元周期構造内に配列した構造、その作成方法例と作用効果を述べる。

実施例1で説明した通り石英基板上に周期的凹凸を形成する。 SiO_2 、 Si を順次（スパッタエッチを含みつつ）成膜する。 Si はノンドープとする。ついで電極として SiO_2/Si の1周期ないし数周期、導電性をもたせつつ成膜する。（なお Si にはn型（または n^+ ）、ないしp型（または p^+ ）を用いる。これらにより導電性を持つ層をPBS特性を保持したまま形成できる。

PBS内部に液晶物質を導入し、ここで述べた電極により電圧を与えれば、液晶の配向を制御することが出来、複屈折や屈折率を制御することが出来、可変波長共振器を形成出来る。

【0029】

[実施例10]

半導体レーザなどの発光素子を3次元周期構造体中に作り込むことにより、発光素子が本来持っている自然放出光の放射を抑えることができ、これによってしきい値電流を極めて小さくすることができる。

【0030】

図37には、面発光レーザあるいはマイクロキャビティレーザ（Microcavity Laser）を3次元PBS内に作製した構造をしめす。当該レーザから出力導波路への結合を除いて、他の方向への自発再結合発光は著しく抑圧されるので、レーザ動作しきい値が減少し有利である。

【0031】

また図38には3次元PBSとレーザを一体集積する方法および当該構造を示す。化合物半導体基板（例えば InP または GaAs ）上に2次元凹凸を形成し、その上に実施例1、2の方法で $\text{SiO}_2/a\text{-Si}$ 等の3次元PBSを形成し、ドライエッチングにより基板上にとどく孔を形成する。その面の上にエピタキシャル成長により半導体レーザを作る。この構造では横方向への不要放射が禁止、または抑制されるのでレーザ動作しきい値が低下して有利である。図37および38において、電極とリードは別に設けてもよく、あるいはPBS中の Si にドープして電気伝導性をもたせ、電極とリードの役目をさせることも出来る。

【0032】

[実施例11]

また、PBSのプログラマブルレーザへの次の応用が可能である。別項（実施例2および図11）で述べたように、特定モードしか許されないPBS構造の内部に電氣的な励起できるpn接合や光学的に励起のできる色素などを設けた複合素子では、許されたモードに関与した発光過程のみが許され、他の自然光が特定方向に沿ってのみ放射される。こうしたPBSにおいてはその構成要素に電気光学効果のある材料を用いるとフィルター特性が外部電圧によって制御できるので、発光素子のスペクトルや発光方向を電氣的にプログラムできる。

【0033】

「実施例12」

フォトダイオードなどの受光素子を導波路で外部と結合された、PBS特性をもつ3次元周期構造体中に作り込むことにより、受光器への外部からの放射即ち雑音入力を抑えることができ、これによって入力雑音の低下と受光感度の向上を図ることができる。また放射立体角の消失または減小に基き零点ゆらぎの自由度が消失または減小し、雑音がいっそう減小する。

【0034】

さらに、プログラマブル受光素子を実現することが次のようにしてできる。完全なPBS構造の内部に特定の波長域にだけ感度を持つようなpn接合や光伝導形の受光素子を組み込むと外部からの信号光も背景光も感光部に到達しない状態となる。この状態からわずかにずれたPBSを用いると、特定の波長の光のみが特定の方向から光検出部に到来する。従ってこの複合素子は入射光の波長と方向（波数）に強い選択性のある複合素子に用いられる、PBSにおいてその構成要素に電気光学効果のある材料を用いるなどフィルター特性が外部電圧の印加によって変化できるので、受光素子の応答特性を電氣的にプログラムすることができる。

【0035】

[実施例13]

図39に示すように基板上の直交するx軸，y軸を対称軸とした2次元的に周

期的な凹凸をもつ基板の上に、共通の周期的凹凸をもつ2種類以上の透明物質を周期的に積層すれば、遮断周波数領域を除く一般の波長域で、その立体構造は実効的光学誘電テンソル

【数7】

$$\bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

をもつ2軸異方性の人工媒質として機能する。適切な設計によれば、天然物質と異なりある範囲の媒質定数を連続的に実現できる、また遮断域近傍で現れる強い分散性のため極めて大きい異方性を実現できるという性質がある。

【0036】

【発明の効果】

以上のように、請求項1の方法によれば、スパッタエッチングを単独で、または製膜と同時に用いる技術の形状整形効果を活かして、極めて微細な、3次元的に周期的な構造体を工業的に作製することが出来るので、フォトニックバンドギャップ効果を実現できる。

【0037】

請求項2によれば、前項の技術を更に発展させ、3次元周期構造の内部に光学的分極率が非線形性をもつ物質、または電気光学材料、または透明体、または導電性物質などを周期的に設けることが出来、多種多様な電子機能、光機能が可能となる。

【0038】

請求項3によれば、3次元周期構造の内部に発光性あるいは光増幅性物質を周期的に設けることが出来、高効率な光能動素子が可能となる。

【0039】

請求項4によれば、周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質をほぼ周期的に順次積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体、即ち光波長のある範囲で遮断特性をもつ人工媒体のなかに、導波路あるいは共振器あるいは分岐器あるいは結合器あるいは反射器、または受光器等の機能部品を集積することが出

来、無放射特性の利点を活用することが出来る。

【0040】

請求項5によれば、3次元周期構造の内部に半導体レーザを設けることができ、自然放出光損失のない高効率のレーザ作用が実現できる。

【0041】

請求項6によれば、基板の上の直交するx軸、y軸を対称軸とした2次元的に周期的な凹凸をもつ基板の上に共通の周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質を周期的に順次積層した構造を実現できるので、任意の値の対角形誘電率テンソルで表される光学的2軸異方性を実現することが出来る。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図2】

本発明を使用しない3次元周期構造の作製方法を示す説明図。

【図3】

本発明を使用しない3次元周期構造の作製方法を示す説明図。

【図4】

スパッタリング法を示す説明図。

【図5】

真空蒸着法を示す説明図。

【図6】

レーザアブレーション法を示す説明図。

【図7】

角度依存性のあるエッチング法を示す説明図。

【図8】

エッチング率の角度依存性を示す説明図。

【図9】

3次元周期構造の特性を説明するための図。

【図10】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 1】

x y 面内に六方対称, z 方向に周期的な構造のブリュアン域を示す説明図。

【図 1 2】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。点線の円は実線で示すべき円孔が本来の位置に存在しないことをあらわす。

【図 1 3】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 4】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 5】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 6】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 7】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 8】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 9】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 2 0】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 2 1】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 2 2】

本発明のひとつの実施例で使用する選択的積層を示す説明図。T は山、V は谷である。

【図 2 3】

本発明のひとつの実施例で使用する選択的エッチングを示す説明図。実線の輪

郭が破線状に変化する。

【図24】

本発明のひとつの実施例で使用する選択的エッチングを示す説明図。実線の輪郭が破線状に変化する。

【図25】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図26】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図27】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図28】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。だ円は島状薄膜金属を表し、曲面上に点在する。

【図29】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図30】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図31】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図32】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図33】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。A、B（即ち1、2）の界面に機能物質Fを挿入する方法が（ロ）、AまたはBをFで構成する方法が（ハ）である。

【図34】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図35】

本発明のひとつの実施例の作製法を示す説明図。

【図36】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図37】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図38】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図39】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【符号の説明】

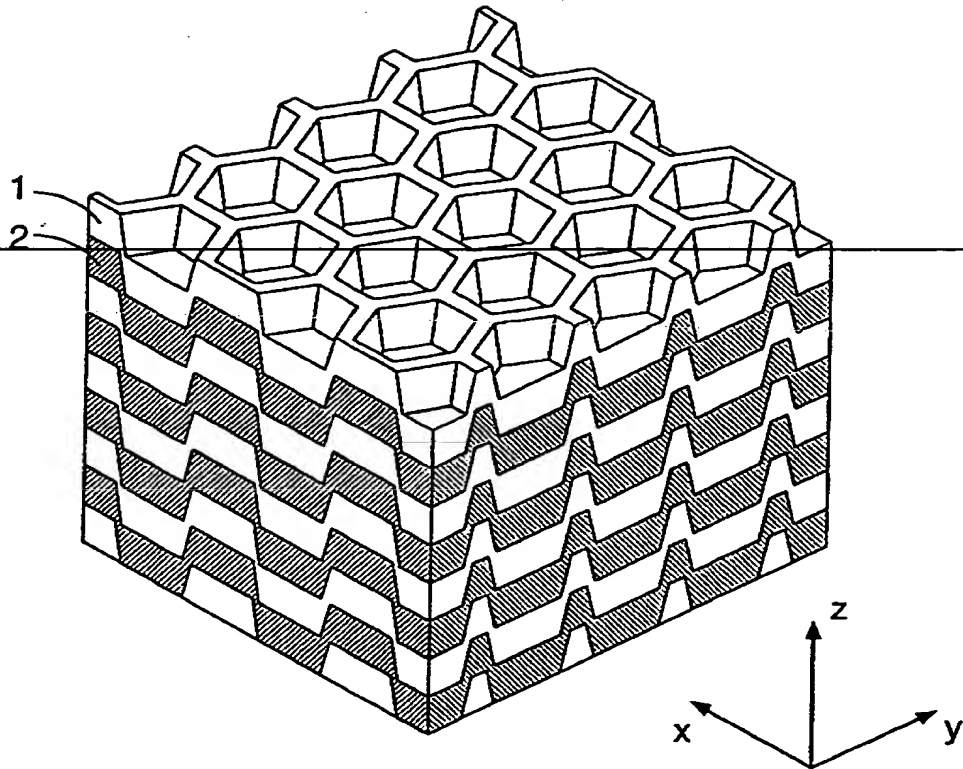
- 1 物質A（例えばSiO₂）
- 2 物質B（例えばSi）
- 3 GaAs
- 4 AlGaAs
- 5 屈折率n₁の物質
- 6 屈折率n₂の物質
- 7 ターゲット
- 8 基板
- 9 蒸着源
- 10 レーザ
- 11 原料物質
- 12 レジスト
- 13 Si
- 14 SiO₂
- 15 金属A（例えばAlなど）
- 16 金属B（例えばPt、Ni、W、Tiなど）
- 17 LiNbO₃
- 18 ErドープSiO₂
- 19 機能単位
- 20 3次元フォトリソニックバンドギャップ構造
- 21 活性領域

特平 9-114951

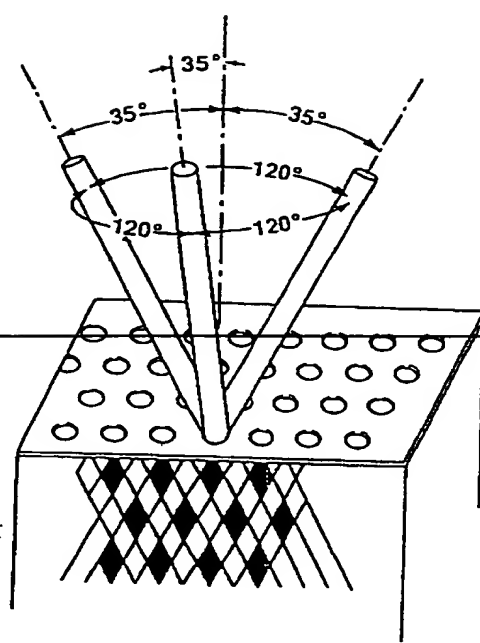
- 2 2 出力導波路
 - 2 3 I I I V 族基板
 - 2 4 エピタキシャル層
-

【書類名】 図面

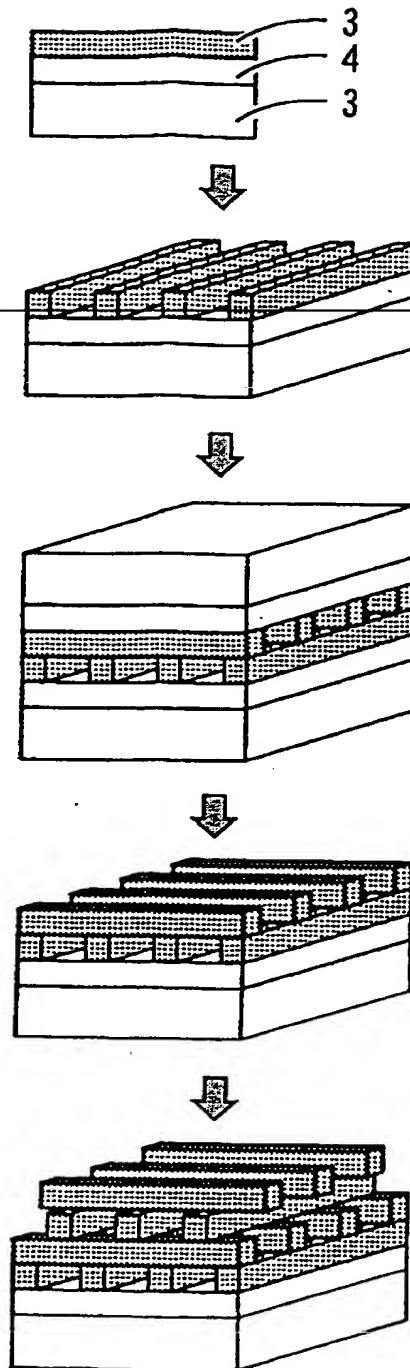
【図1】



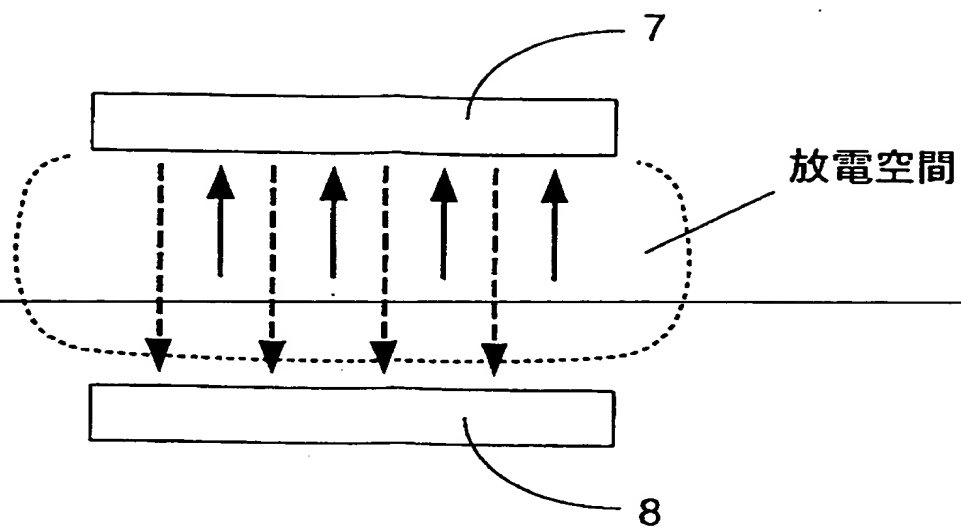
【图 2】



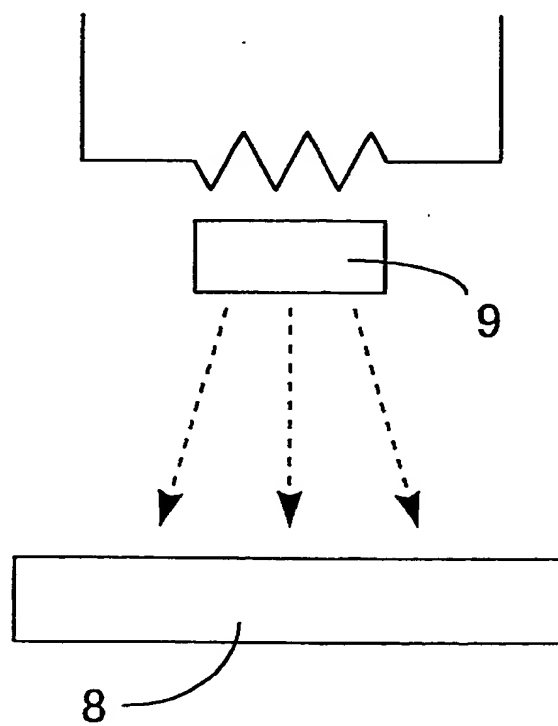
【図3】



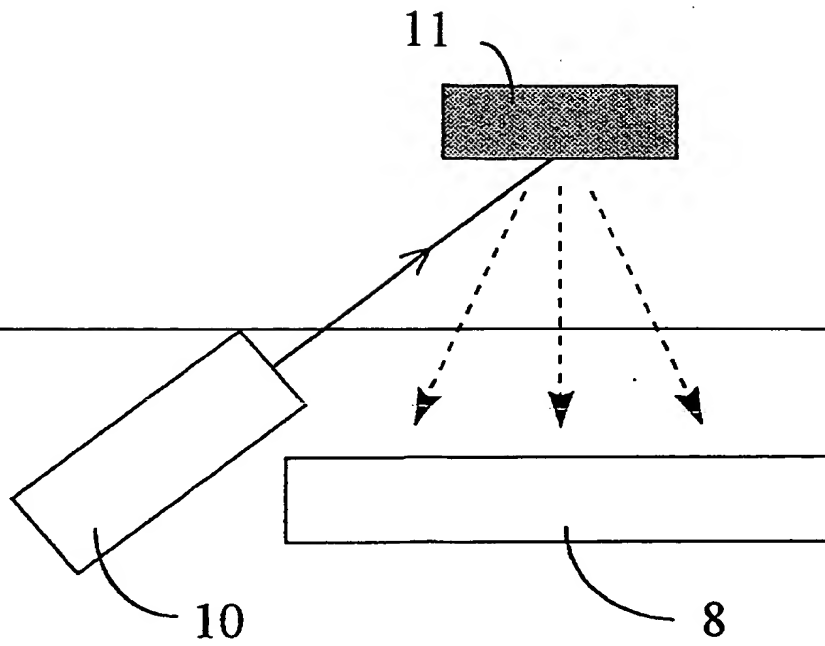
【図4】



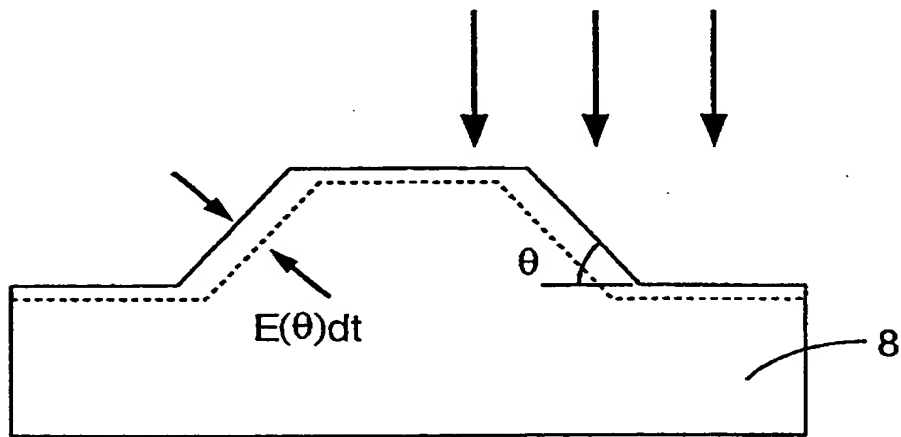
【図5】



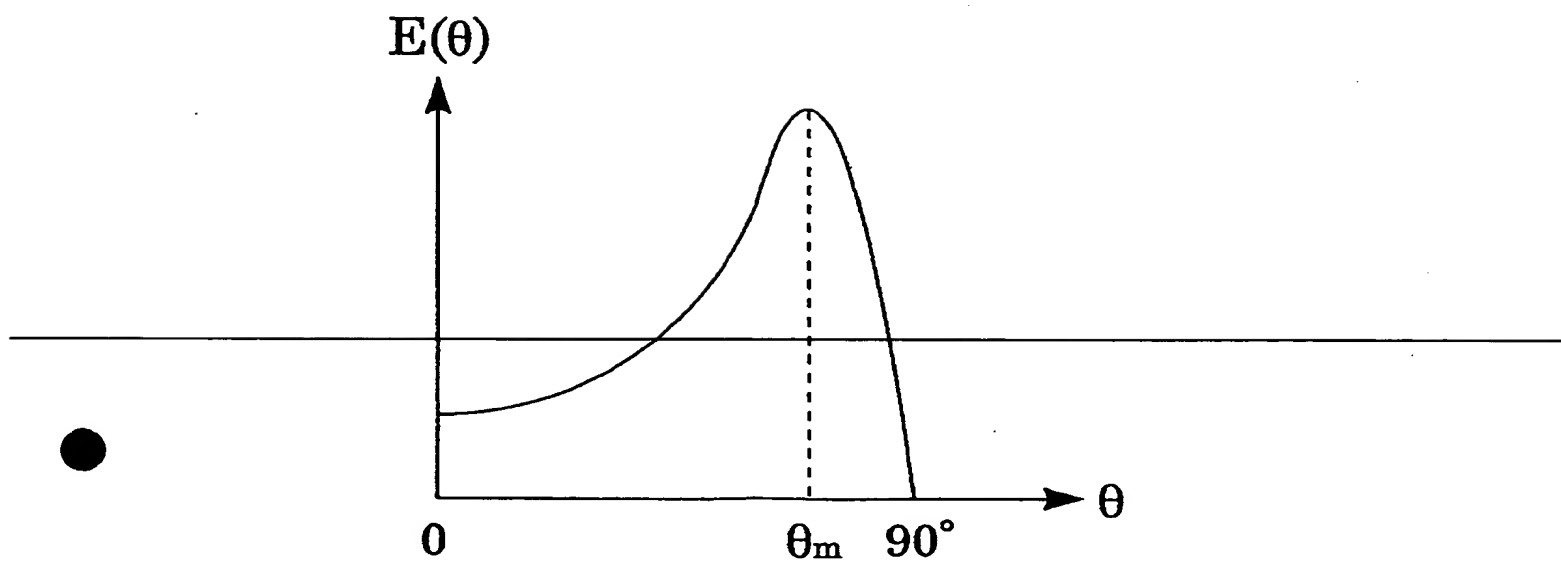
【図6】



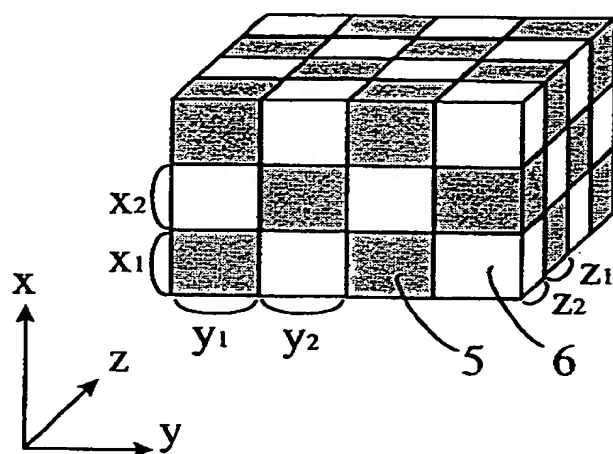
【図7】



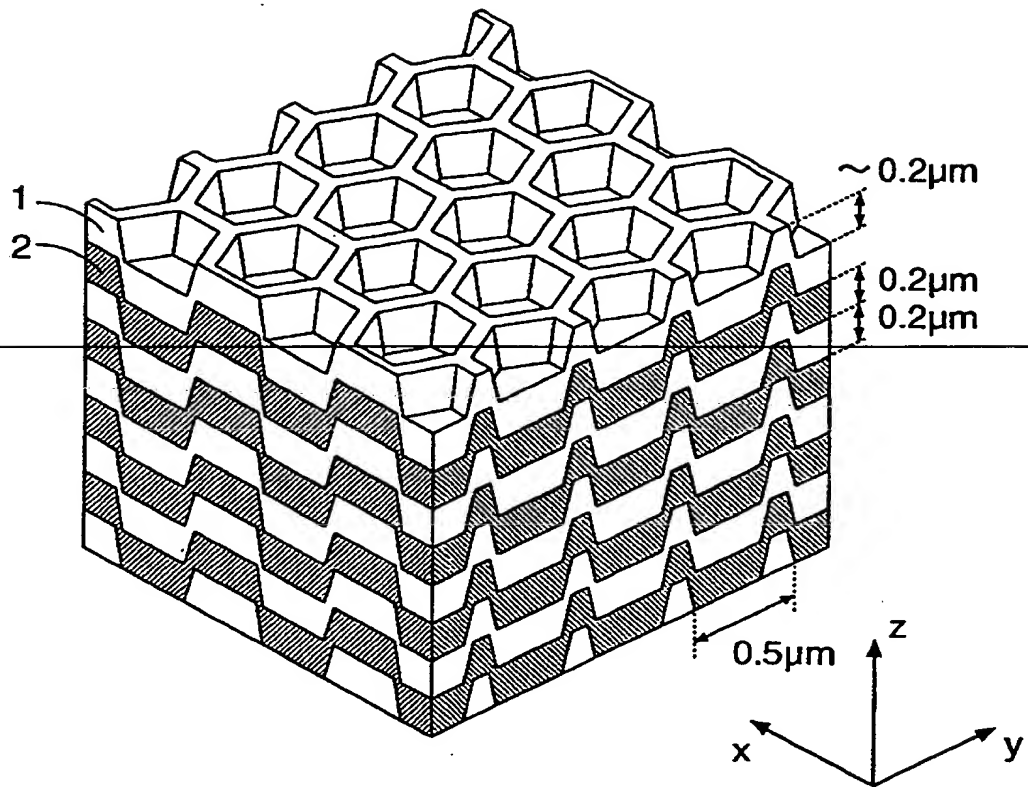
【图 8】



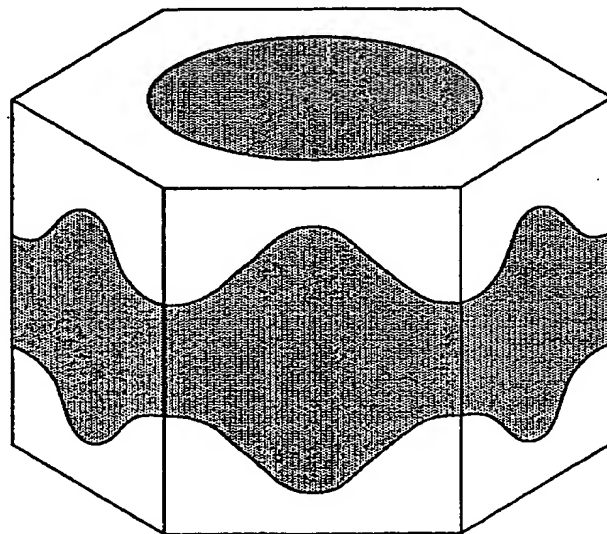
【图 9】



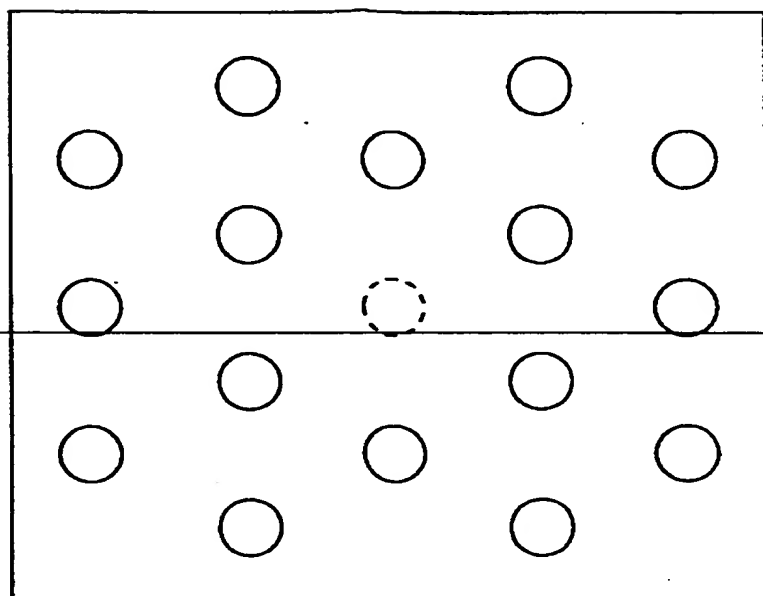
【図10】



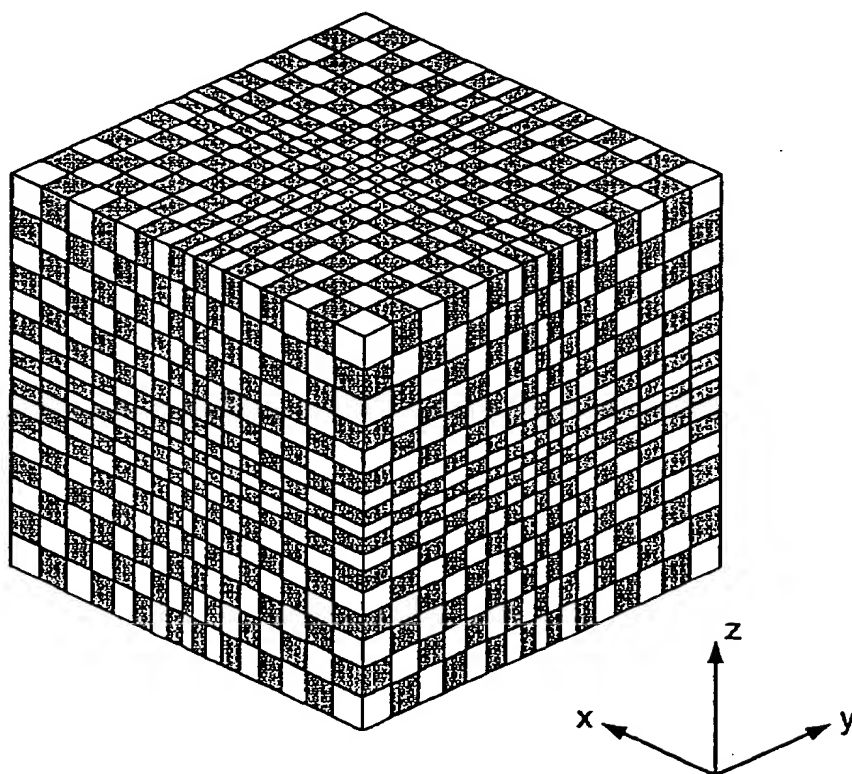
【図11】



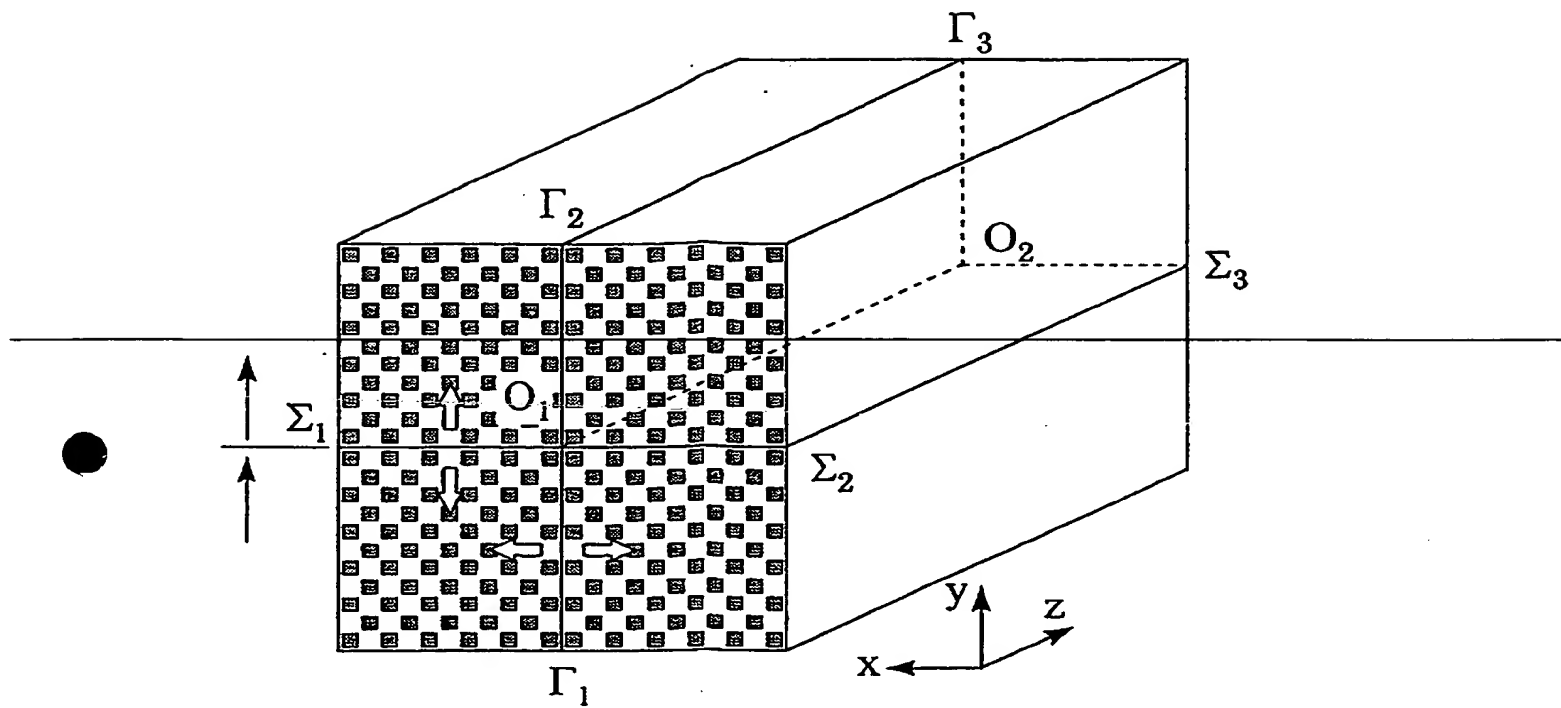
【图 1 2】



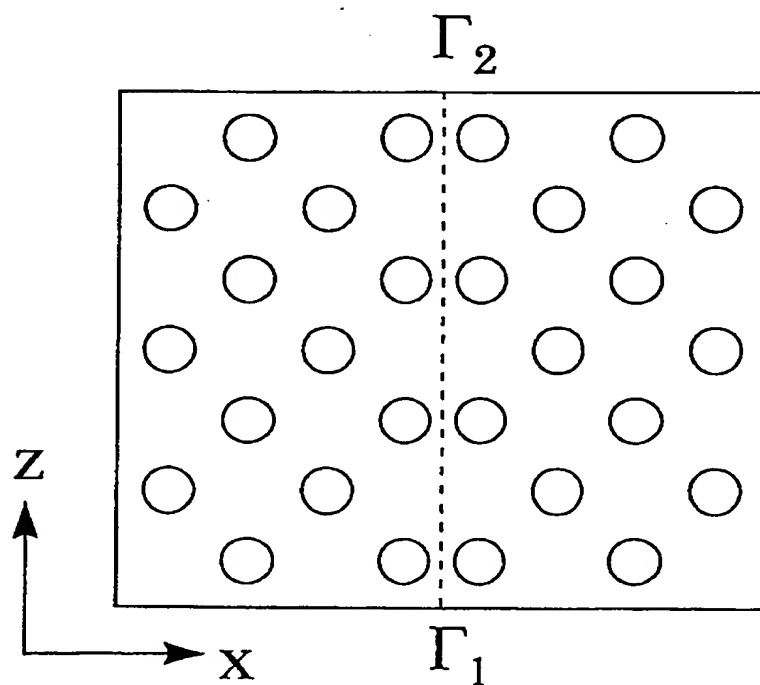
【图 1 3】



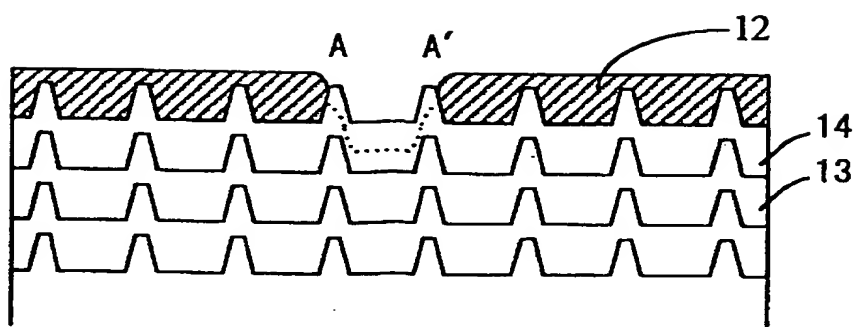
【図 1 4】



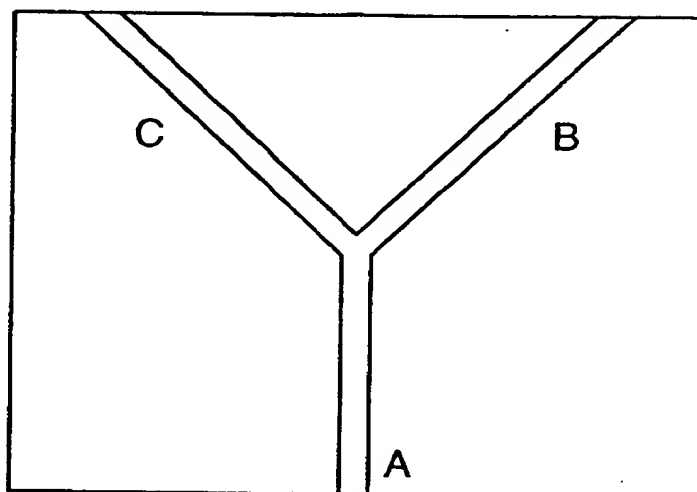
【図 1 5】



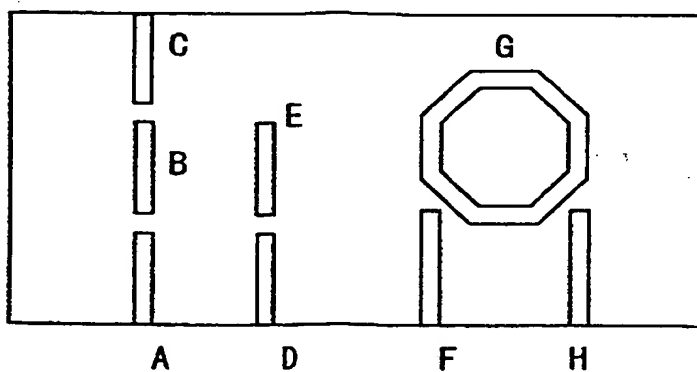
【図16】



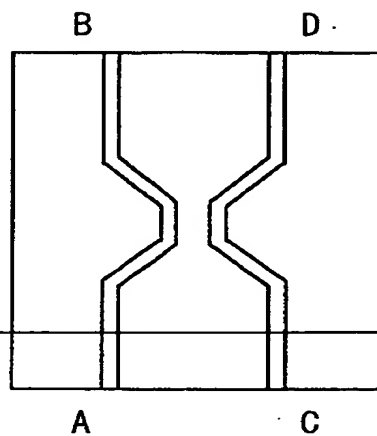
【図17】



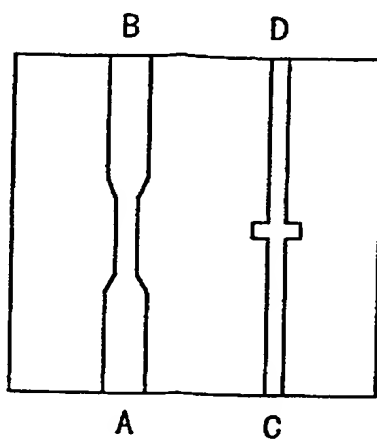
【図18】



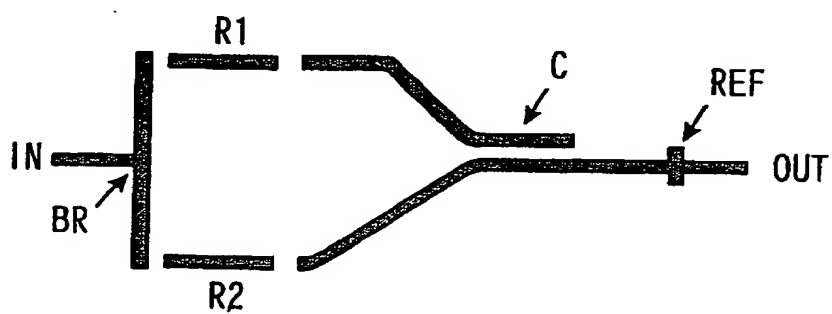
【図19】



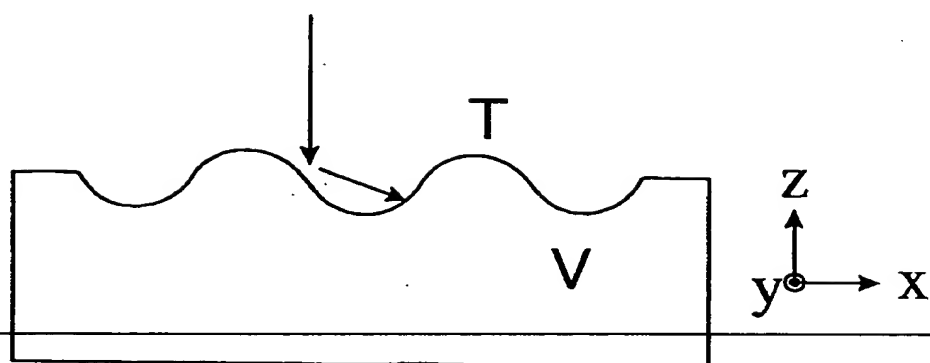
【図20】



【図21】



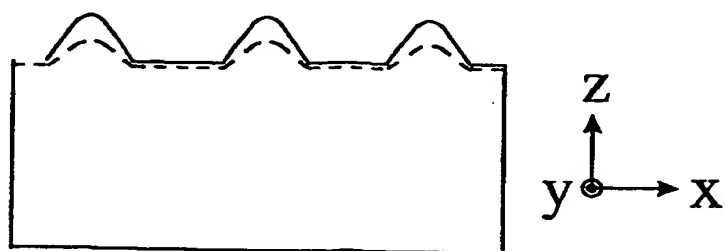
【图 2 2】



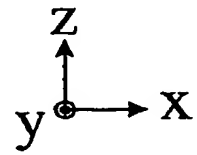
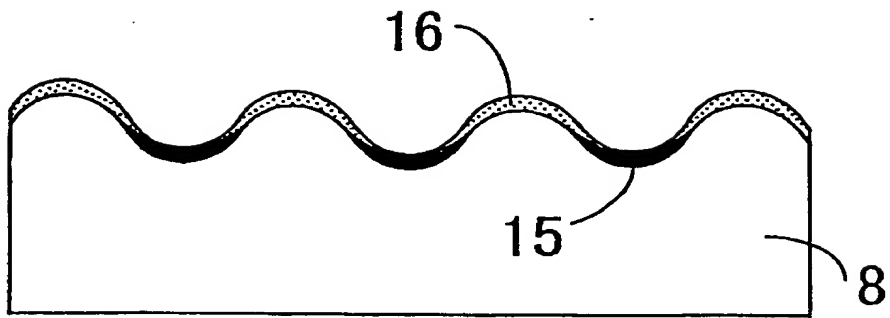
【图 2 3】



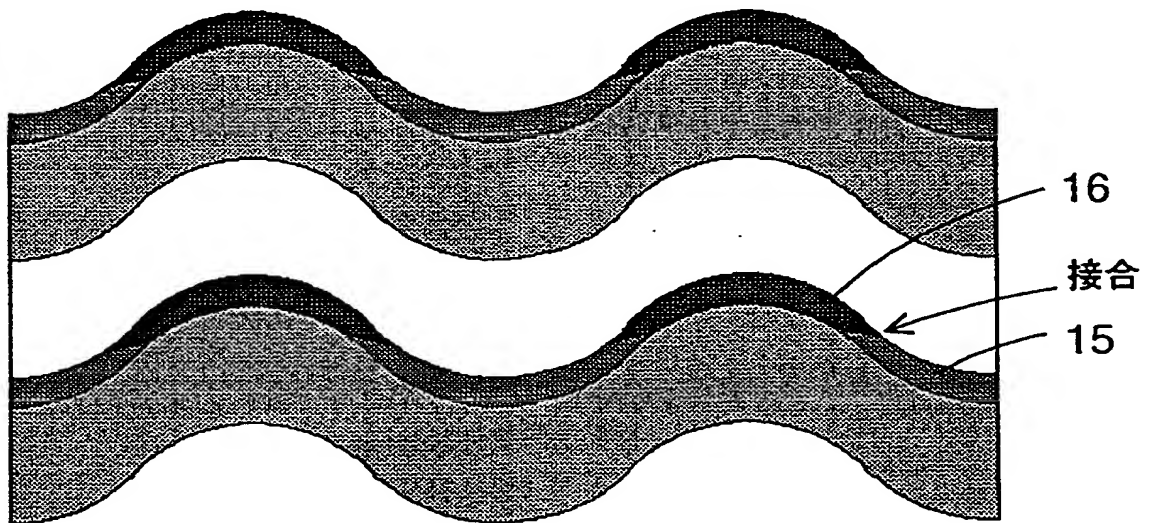
【图 2 4】



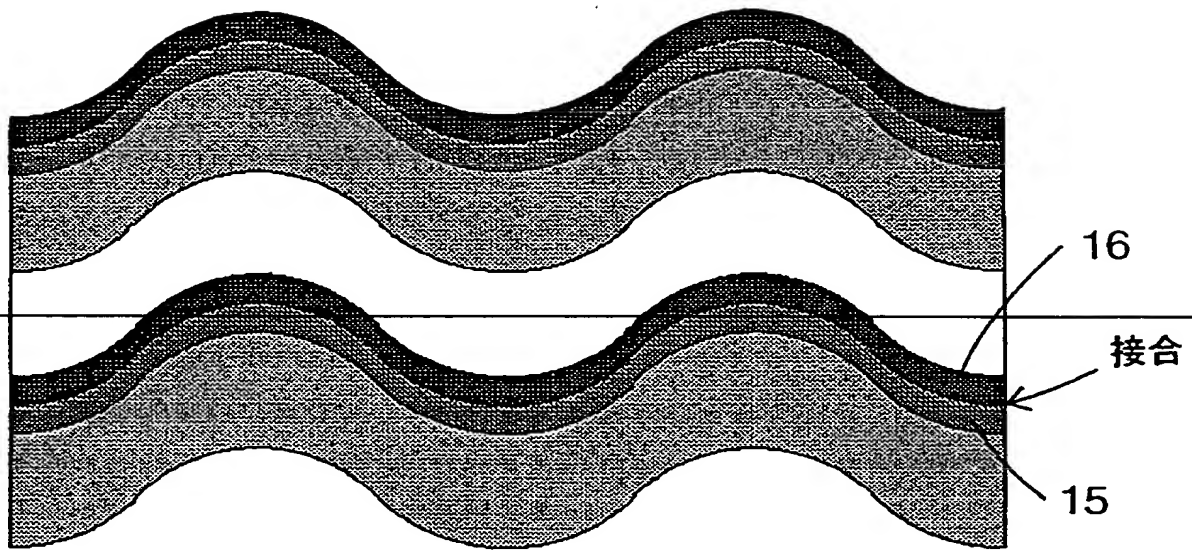
【図25】



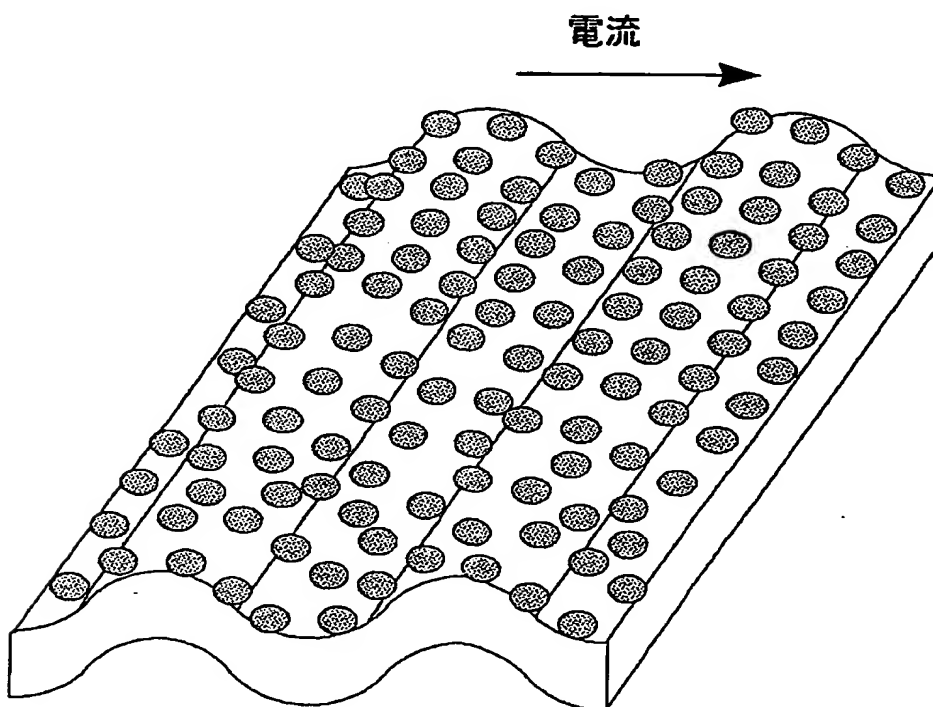
【図26】



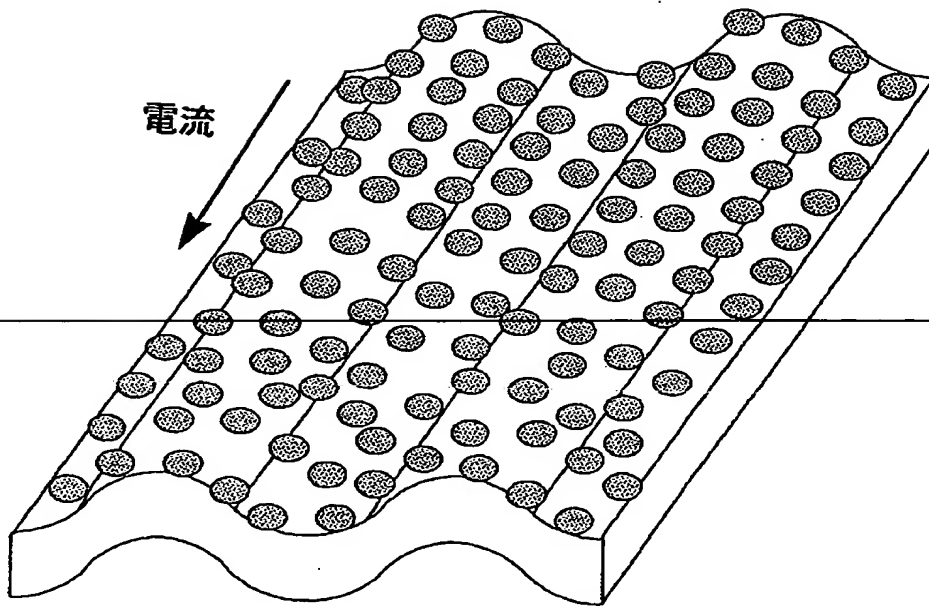
【図 2 7】



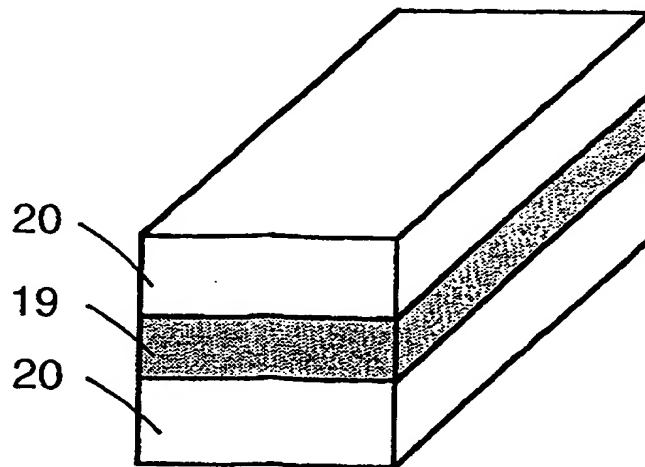
【図 2 8】



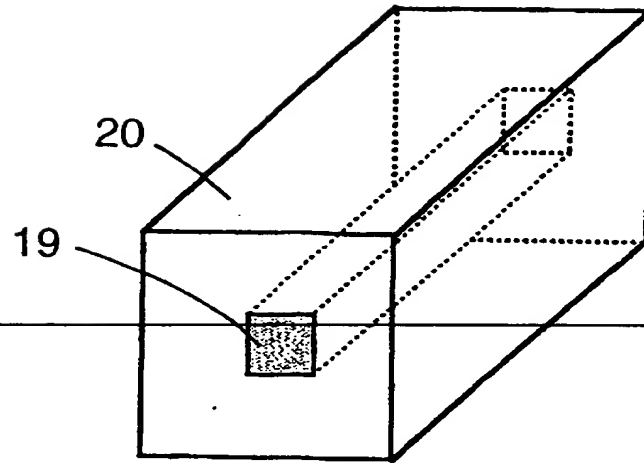
【図29】



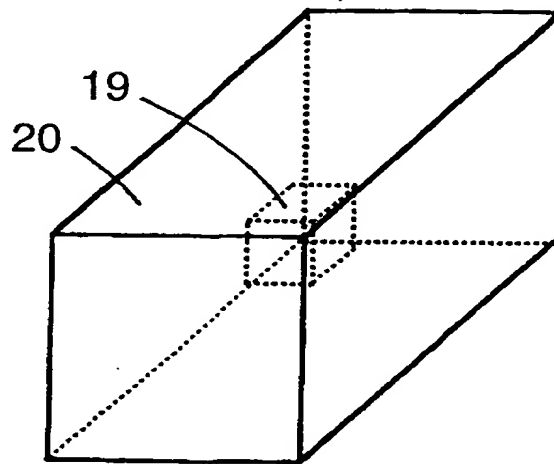
【図30】



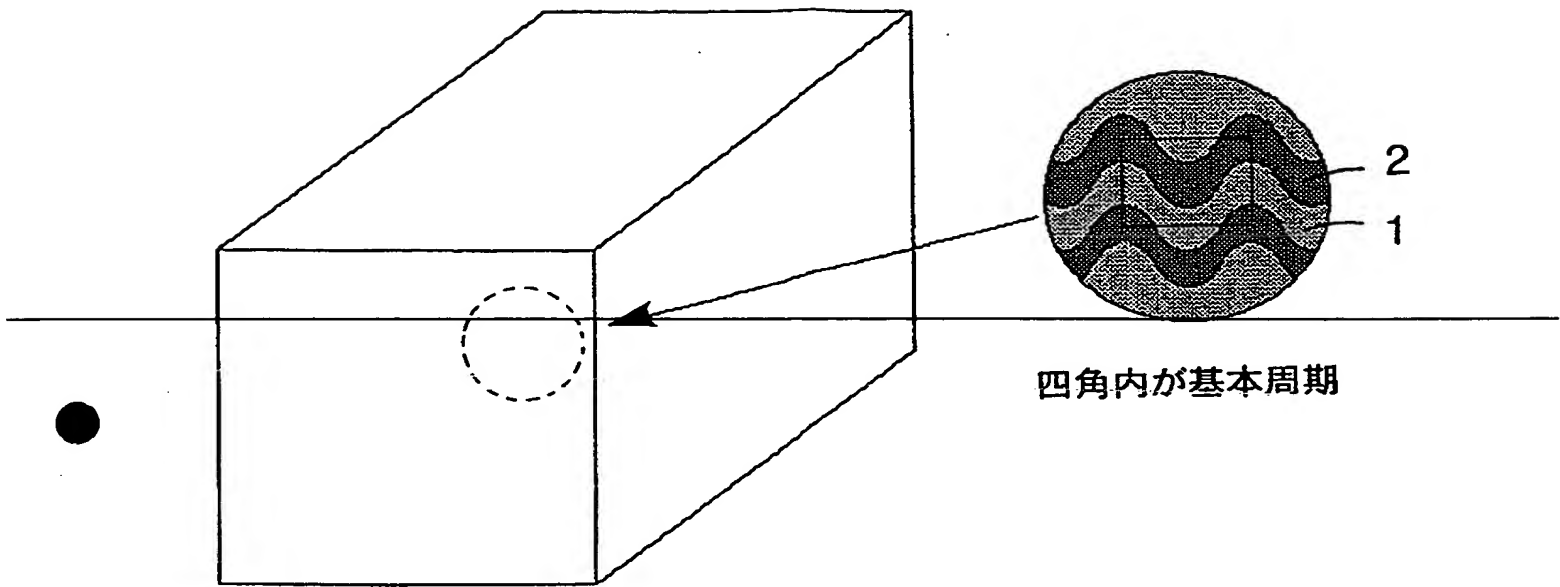
【図31】



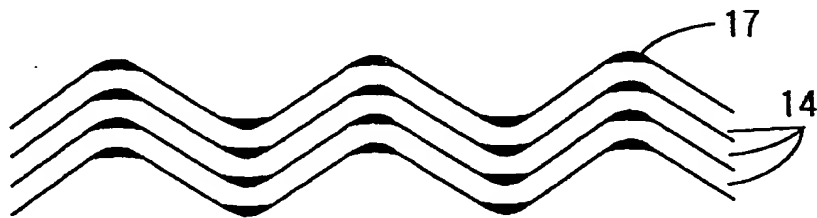
【図32】



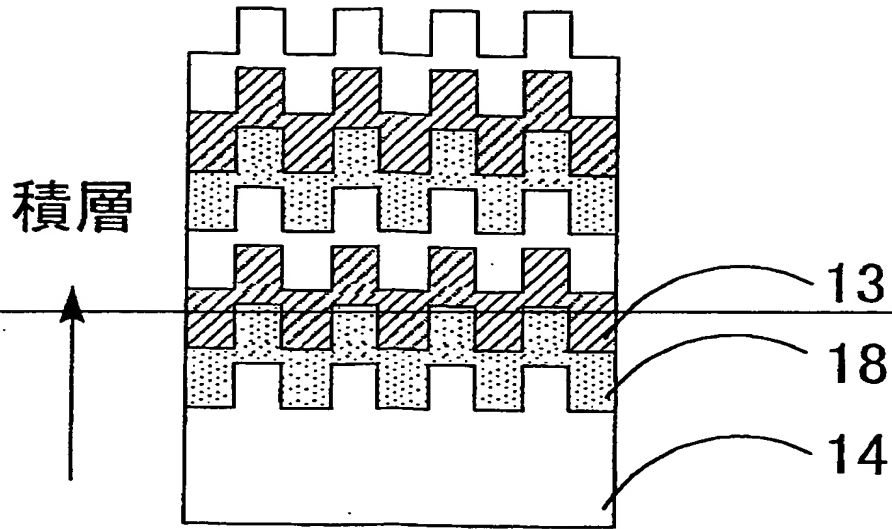
【図33】



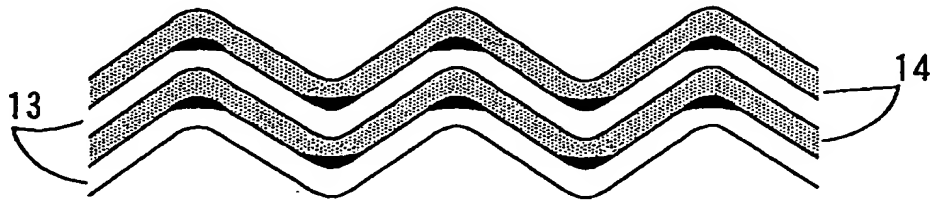
【図34】



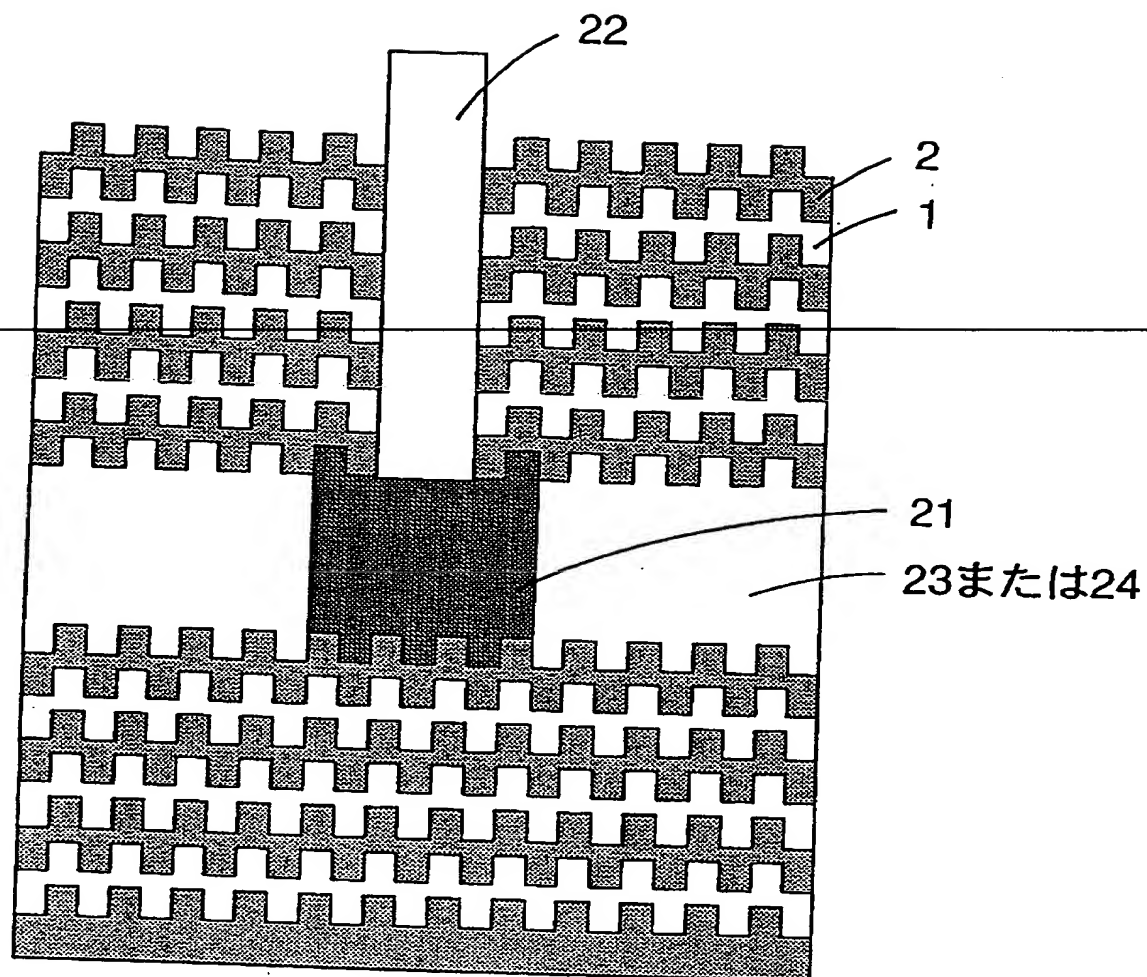
【図35】



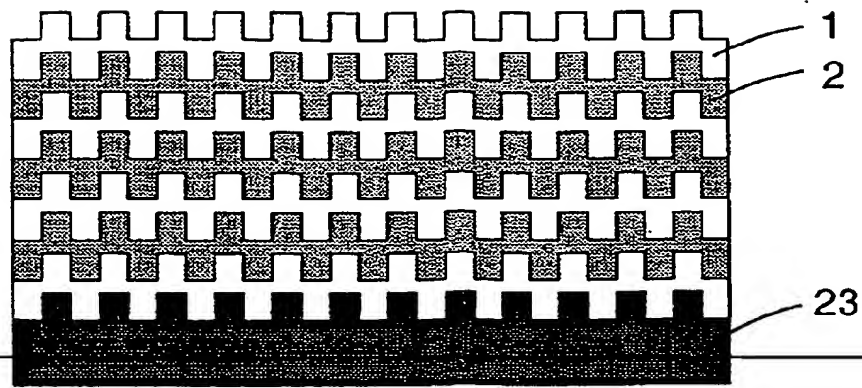
【図36】



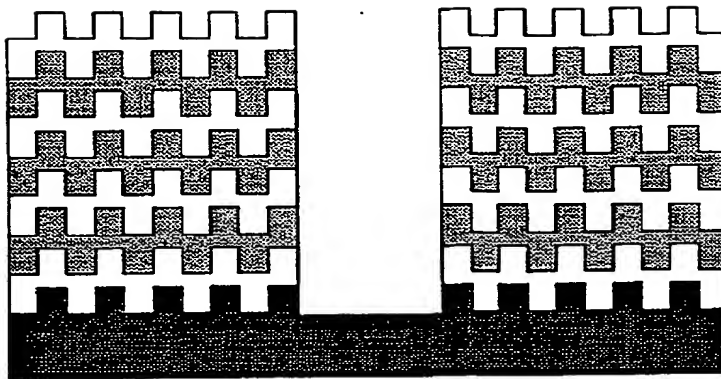
【図37】



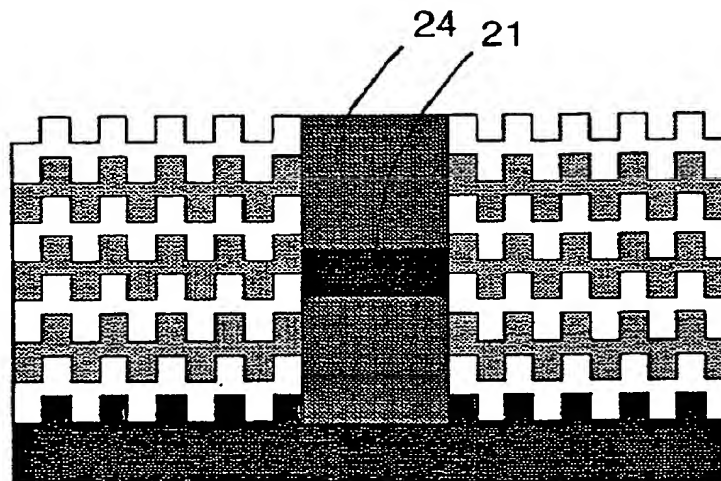
【図38】



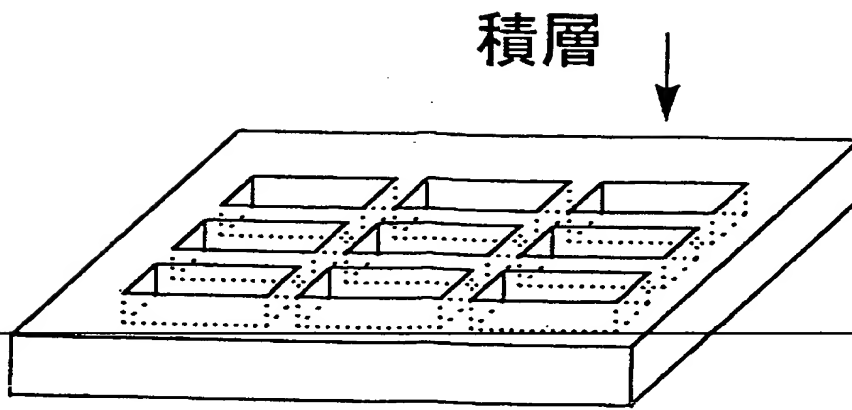
エッチング



エピタキシャル成長



【図39】



【書類名】 要約書

【要約】

【目的】 周期が $1\ \mu\text{m}$ 程度ないしそれ以下の3次元周期構造を提供する。

【構成】 2次元的にほぼ周期的な凹凸を持つ2種類以上の膜状物質をほぼ周期的に順次に積層した構造を持つ、3次元的にほぼ周期的な構造体から成る。一例として、屈折率の異なる材料1と材料2から構成される。

【効果】 簡単な製造方法により、周期が $1\ \mu\text{m}$ 程度ないしそれ以下の3次元周期構造体を得られる。この構造によって、着目する波長に対して、基板の面内の複数の軸方向および積層の方向を含む多くの立体角方向への伝搬を遮断させることができる。

【選択図】 図1

【書類名】 職権訂正データ
【訂正書類】 特許願

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】 申請人
【識別番号】 391006566
【住所又は居所】 宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋マンションファラオC-09
【氏名又は名称】 川上 彰二郎

特平 9-114951

【書類名】 手続補正書
【提出日】 平成 9年 6月26日
【あて先】 特許庁長官殿
【事件の表示】
【出願番号】 平成 9年特許願第114951号

【補正をする者】
【事件との関係】 特許出願人

【識別番号】 391006566

【郵便番号】 984

【住所又は居所】 宮城県仙台市若林区土樋 2 3 6 番地 愛宕橋マンション
ファラオC-09

【氏名又は名称】 川上 彰二郎

【発送番号】 016045

【手数料補正】

【補正対象書類名】 特許願

【納付金額】 21,000円

【書類名】 職権訂正データ
【訂正書類】 手続補正書

<認定情報・付加情報>

【補正をする者】 申請人
【識別番号】 391006566
【住所又は居所】 宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋マンションファラオC-09
【氏名又は名称】 川上 彰二郎

【書類名】 手続補正書
【整理番号】 KAW004H
【提出日】 平成 9年 7月14日
【あて先】 特許庁長官 殿
【事件の表示】
【出願番号】 平成 9年特許願第114951号
【補正をする者】

【事件との関係】 特許出願人
【識別番号】 391006566
【氏名又は名称】 川上 彰二郎
【代理人】
【識別番号】 100088096
【弁理士】
【氏名又は名称】 福森 久夫
【電話番号】 03-3261-0690

【手続補正 1】

【補正対象書類名】 明細書
【補正対象項目名】 全文
【補正方法】 変更
【補正の内容】 1

【手続補正 2】

【補正対象書類名】 図面
【補正対象項目名】 図 1 4
【補正方法】 変更
【補正の内容】 25

【手続補正 3】

【補正対象書類名】 図面
【補正対象項目名】 図 1 5
【補正方法】 変更

【補正の内容】 26

【手続補正 4】

【補正対象書類名】 図面

【補正対象項目名】 図 3 6

【補正方法】 変更

【補正の内容】 27

【手続補正 5】

【補正対象書類名】 図面

【補正対象項目名】 図 3 9

【補正方法】 変更

【補正の内容】 28

【手続補正 6】

【補正対象書類名】 要約書

【補正対象項目名】 全文

【補正方法】 変更

【補正の内容】 29

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 3次元周期構造体及びその作製方法

【特許請求の範囲】

【請求項1】 2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ基板の上に2種類以上の物質をほぼ周期的に順次積層し、その積層の中の少なくとも一部分にスパッタエッチングを単独で、または成膜と同時に用いることにより形成した3次元的にほぼ周期的な構造体。

【請求項2】 2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ基板の上に2種類以上の物質をほぼ周期的に順次積層し、その積層の中の少なくとも一部分にスパッタエッチングを単独で、または成膜と同時に用いることにより3次元的にほぼ周期的な構造を形成する作製方法。

【請求項3】 2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状物質をほぼ周期的に順次積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体の少なくともその一部分において、または2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ1種類以上の膜状物質をほぼ周期的に積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体の膜の界面において、光学的分極率が非線形性をもつ物質、または電気光学材料、または透明体、または導電性物質を含む構造体。

【請求項4】 2種類以上の透明体よりなる、請求項2の方法により作成された3次元的にほぼ周期的な構造体の少なくともその一部分において、発光性あるいは光増幅性物質を含む構造体。

【請求項5】 2次元的にほぼ周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質をほぼ周期的に順次積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体の内部に、導波路あるいは共振器あるいは分岐器あるいは結合器あるいは反射器、または受光器を含む構造体。

【請求項6】 2種類以上の透明体よりなる、請求項2の方法により作成された3次元的にほぼ周期的な構造体の内部に、半導体レーザを含む構造体。

【請求項7】 基板の上の直交するx軸、y軸を対称軸とした2次元的に周期的な凹凸をもつ基板の上に共通の周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質を周期的に順次積層した構造をもち、光学的に2軸異方性を示すことを特徴と

する透明3次元構造体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】

本発明は、光波回路素子として用いられる3次元的にほぼ周期的な屈折率分布を持つ構造、およびその製造方法と応用技術・応用デバイスにわたるジェネリックな（包括生成的な）技術に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

物質内において周期が1mm程度ないしそれ以下の3次元周期構造を作製する技術は光技術・電子技術分野において潜在的な応用範囲は広い。しかしながら、その作製方法はまだ開発されていないため、周期が1mm程度ないしそれ以下の3次元周期構造は実現されるに至っておらず、これまで次に挙げる2種のものが検討されただけである。（1）図2に示すような、3方向からドライエッチングで穴を形成するもの（E. Yablonovitch, "Photonic band-gap structures", J. Opt. Soc. Am. B, vol.10, no.2, pp.283-295, 1993）。（2）図3に示すような、すだれ状の基板を対向・ボンディングし、選択エッチングで基板の一方を除去し、再び対向・ボンディングさせる、という操作を繰り返すもの（S. Noda, N. Yamamoto, and A. Sasaki, "New realization method for three-dimensional photonic crystal in optical wavelength region", Jpn. J. Appl. Phys., vol.35, pp.L909-L912, 1996）。これら2種の概念は、周期が1mm程度ないしそれ以下のものは現在まで実現されていない。

【0003】

【発明が解決しようとする問題点】

前項（1）の方法では、1～2周期以上の加工は不可能であるという問題点がある。また、前項（2）の方法では、選択化学エッチングやボンディングという制御性の低い手工業プロセスに多数回頼るため、再現性・生産性が低いという問題点がある。

【0004】

本発明は、上記従来技術の課題を解決すべくなされたものであり、周期が1 mm程度ないしそれ以下の3次元周期構造体とその応用部品・デバイスを提供すること、および、それらの作製方法を提供することが目的である。

【0005】

【問題点を解決するための手段】

上記目的を達成するためには、信頼度・再現性にすぐれた方法で3次元的にほぼ周期的な構造体を実現することが必要である。このためには、2種類以上の物質をほぼ周期的に順次積層し、その積層の中の少なくとも一部分にスパッタエッチングを単独で、または成膜と同時に用いる方法が有効である。この方法によって、周期が1 mm程度ないしそれ以下の3次元周期構造体を作製することができる。

【0006】

【作用】

前項の手段によって3次元周期構造体を構成すれば、周期が1 mm程度ないしそれ以下のものが簡便に再現性よく実現できる。また、光学的分極率が非線形性をもつ物質、または発光性あるいは光増幅性物質、または電気光学材料、または透明体、または導電性物質などを周期構造の中に取り込むことができ、さらに、導波路あるいは共振器あるいは分岐器あるいは結合器あるいは反射器、または半導体レーザ、または受光器などを周期構造中に作り込むことができるため、3次元周期構造体の応用部品・デバイスを信頼度・再現性にすぐれた方法で作製することができる。本発明は共通の根幹から発して多様な発展を内包するジェネリック（包括生成的）なものであり、このことはこれに続く実施例を通じて明示される。

【0007】

【実施例】

〔実施例1〕

はじめに薄膜の形成・エッチングについて、本発明で述べているもの、本発明に適用可能なもののいくつかを概略説明する。

図4にはスパッタリング成膜の原理図を示す。放電空間内に薄膜の原料物質の

供給源であるターゲットをおく。気体イオンがターゲットに入射してターゲット物質を飛散させる（実線矢印）。その飛散した物質粒子は、放電空間に隣接する基板に到着・付着する（破線矢印）。図5には真空蒸着法の概念を示す。抵抗加熱ないし電子ビーム加熱された蒸着源から原料物質が真空中に蒸散し、基板に到着・付着する。図6にはレーザアブレーション法の概念を示す。大出力のパルスレーザ光を原料物質に入射させることにより原料物質の一部分を瞬間的に加熱・蒸散させ、基板に到着・付着させる。

【0008】

また、本発明において膜を整形する役割をもつスパッタエッチングについて図7によって説明する。基板を放電空間において気体イオンを入射させる。これは逆スパッタと呼ばれる。そのとき基板表面の物質がエッチング除去される。単位時間にエッチングされる面が法線方向に後退する割合を面の傾き θ の関数として定義し、エッチング率という。エッチング率 $E(\theta)$ は多くの物質に対し図8に示す性質をもつ。すなわち 0° と 90° の間にある角 θ_m で最大でそれを境に左右両方向に単調に減少する。このスパッタエッチングは、前述のスパッタリング成膜、真空蒸着、レーザアブレーションの前または後に実行することができる。またスパッタエッチングと別種の成膜を同時に進行させることもできる。例えば、スパッタリングによる成膜とスパッタエッチングとを同時に進行させる同時プロセスをバイアススパッタリングと呼ぶ（例えば、杉山典三、佐藤尚、大野潤、川上彰二郎、「 $a-Si:H/SiO_x:H$ からなる積層形偏光分離素子の作製」、1996年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会C-266）。

【0009】

3次元周期構造体形成の一例を述べる。溶融石英基板上に、電子ビームリソグラフィおよびドライエッチング法により、周期的な孔の列を形成する。または基板上に膜を形成しその膜に孔の列を形成してもよく、それをふくめて基板という。その上に Si および SiO_2 を高周波スパッタリング法により堆積し、その中の SiO_2 の積層の一部分には、高周波により電離したイオンが基板表面に入射してエッチングを行う作用、即ちスパッタエッチングと、高周波スパッタリン

グによる積層を同時に進行させる。スパッタエッチングの整形作用を利用しているので、SiおよびSiO₂を多数周期積層しても基板上の2次元周期形状は失われず、数十周期の積層を行って表面の周期構造は安定であることが原子間力顕微鏡観察で確認されている。内部は図1（具体的には図10）に示すとおり3次元の周期性の高い構造を形成している。本例において、Siは当初アモルファス物質として堆積されるが、イオン衝撃の効果および加熱によってSiを微結晶化させることができる。

【0010】

もう一つの構造の作製方法を説明しておく。図1により説明した方法においては2種類の物質が同程度の厚さをもつが、後述するように別種の機能性材料（ゲスト）を、構造を形成する単一主成分（ホスト）の凹凸表面に、ホストよりはるかに薄く積層し周期を繰り返すことが可能である。即ち、仮にゲストを導入しなければホストは結果的に均一の構造を持つ。換言すれば、均一なホスト材料の間に、ゲストの3次元周期構造を埋め込んだ構造を作製することができる。ホストを2種類以上の物質の、ゲストより厚い膜の周期構造体とするホスト・ゲスト型3次元周期構造体の形成も同様にしてなされる。なお、図1に即して説明すると、物質Aの表面とBの表面とがすべて同一であれば問題なく、仮にAの表面とBの表面が一致しなくとも異なる層の間でAどうし、Bどうしが同形をもてば周期性が保たれる。

【0011】

【実施例2】

透明体からなる、媒質内光波長の半分内外の周期をもつ3次元の周期構造については、フォトリック・バンドギャップという効果が理論上予言され、マイクロ波帯（例えば波長3cm帯）のモデル実験で理論が検証されている。3次元周期構造について説明するため、図9に3次元周期構造の概念を示す。3次元周期構造は、屈折率 n_1 , n_2 ($n_1 > n_2$) をもつ厚さ d_1 , d_2 の透明体5、6から構成され、 x , y , z 方向にそれぞれ周期 $x_1 + x_2$, $y_1 + y_2$, $z_1 + z_2$ をもつ。簡単のために $x_1 + x_2$, $y_1 + y_2$ ともに $z_1 + z_2$ より十分大きく（ z_1 , z_2 は d_1 , d_2 と同じ意味である）、

【0012】

【数1】

$$n_1 d_1 = n_2 d_2$$

を満たすと仮定する。z 方向に進む波は以下説明する性質をもつ。ある自由空間波長 λ_0 を中心とする光の波長範囲

【数2】

$$\lambda_1 < \lambda < \lambda_u$$

において、+z 方向に進む光波は進行するに伴って振幅が指数的に減少し、伝搬することができない。-z 方向にも同様である。 λ_0 の満たす条件は、

【0013】

【数3】

$$\frac{\lambda_0}{4} = n_1 d_1 = (n_2 d_2)$$

であり、

【数4】

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{4}{\pi \lambda_0} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \right)$$

【0014】

【数5】

$$\frac{1}{\lambda_u} = \frac{4}{\pi \lambda_0} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \right)$$

である。

【0015】

n_2/n_1 が1に近いときは、

【数6】

$$\frac{\lambda_u - \lambda_l}{\lambda_0} \sim \frac{4}{\pi} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$$

(λ_0 は λ_u 、 λ_l のほぼ中心)

で与えられる。この現象をBragg遮断という。遮断の中心波長は周期の長さに比例する。遮断の生ずる波長域の幅は n_1 と n_2 とがほぼ一致するとき0に近づき、 $n_1 n_2$ の比が大きくなるとき幅は λ_0 の数分の一のオーダーとなる。ゆえに、いわゆるBragg波長 λ_0 からある程度離れた波長の光も n_1/n_2 の比が十分大きいと遮断される。構成材料をa-Si(屈折率3.26)およびSiO₂(屈折率1.46)とする。この材料系で上式により $1/\lambda_l$ 、 $1/\lambda_u$ を求めるとそれぞれ $1/\lambda_0$ から25%減、25%増となる。

【0016】

また、Siを結晶化し、HF水溶液によって、Siを残してSiO₂を溶かし去ることができる。そのあとを例えば空気で満たすとき、この構造において屈折率比は3.4:1になり、同様に $1/\lambda_l$ 、 $1/\lambda_u$ は $1/\lambda_0$ から36%減、36%増となる。

【0017】

3次元周期構造において、任意の方向に向う波は一般に立体角方向ごとに異なる周期を見るので、それぞれの方向ごとの遮断波長帯をもつ。特定の自由空間波長 λ_s をもつ光が、その3次元周期構造内のすべての立体的な方向に関して遮断波長帯に共通に含まれるならば、波長 λ_s の光をその3次元周期構造の中に完全に閉じ込めることができる。

【0018】

一例として図10に示すように周期構造を形成した。方向x、y、zに対する周期はそれぞれ0.87 μ m、0.5 μ m、0.4 μ mとなる。材料系はa-SiおよびSiO₂である。数十周期にわたる周期性が確認された。

【0019】

具体的に示すならば、xy面内に六方対称、z方向に周期的な構造ではいわゆ

るブリュアン域は一例として図11に示す形をとる。波数の原点は六角柱の中心である。比 n_1/n_2 が十分大きいと、考えている波長 λ_s がブリュアン域の表面全体において遮断域に共通に含まれ波が一切放射しない。それより n_1/n_2 が小さくなると例えば図の白い部分を除く表面に対し λ_s は遮断域に共通に含まれ、後に示すように多くの応用には十分である。すなわち六角柱の中心から、斜線を施した領域内の一点へ向かう方向の放射波は抑圧され遮断される。

【0020】

また、本例においても本出願全体でも「周期構造」という語を用いているが、勿論出願全体を通じて、周期性が厳密に成り立っていることに限定されない。作成条件の小さい変化による乱れは影響が小さく、あるいは意図的に周期性をわずかに乱すことにより次のような効果を生むことができる。

【0021】

図12に示すように、基板上の周期孔を1個または数個を省いて基板を作製し、その上に SiO_2/Si の周期構造を実施例1のごとく形成すれば、周期性の乱れた部分が基板に垂直な方向に線状に形作られる。このような領域に沿って光波を伝搬させることができるので、放射の禁止された特異な空間と外部の空間とを結ぶ光の取り出し口・導入口とすることができる。ゆえに周期構造中のこのような乱れは有用である。

同様に3次元フォトリックバンドギャップ構造中の点状ないし有限長の線状の乱れ、ループ状の乱れは共振器の動作を行う。

【0022】

図13には、積層方向および基板面内で、周期を空間的に三つの軸方向ともにゆるやかに変化させて実施例1の方法により形作った3次元フォトリックバンドギャップ構造を示す。3次元フォトリックバンドギャップ構造内の特定の方向をもつ光に関し、Bragg遮断条件を満たす周期の部分が空間内の適当な位置において存在するので、光はその領域で折り返すことになり、広い波長域、広い立体角範囲にフォトリックバンドギャップ構造特性が保証される。 x 、 y 方向には変調なく、 z 方向のみに周期を変調するなどの拡張も勿論可能である。

【0023】

〔実施例3〕

本実施例は3次元フォトリソニックバンドギャップ構造において、光を外部との間で出し入れする導波路や内部で波長を選択する共振器、分岐器などの回路素子の作製方法に関するものである。さきに図12で説明した通り光を積層面に直角をなす方向に出し入れすることができる。また、図14は直角格子状の回路素子の形成方法を説明している。石英基板上に図15に示す如く孔の列を形成する。ここで、線 $\Gamma_1\Gamma_4$ に沿ってx方向の周期にずれを与える。その上にSi/SiO₂を実施例1のプロセスにより積層する。積層を十分な数繰り返したのち、面 $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3$ において積層の厚さ方向に図14に示すずれを与える。この方法により光のパワーを線 O_1O_2 の近くに局在させ、 O_1O_2 に沿って伝搬させることができる。

【0024】

この構造において次のことが生ずる。面 $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3$ のずれにより、光は $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3$ から左方にも右方にも、遠ざかるにつれ振幅が指数的に減少するので波は $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3$ に沿い局在する。また $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3$ のずれにより光は $\Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3$ から上方にも下方にも遠ざかるにつれ振幅が指数的に減少する。その両方の作用により波は O_1O_2 に沿い局在し、その方向に伝搬が生ずる。

【0025】

周期性のずれを用いる伝搬路の形成とは別に、屈折率の異なる部分の導入による伝搬路の形成が可能である。図16には図1に示したSi/SiO₂3次元周期構造の作製中の、SiO₂が積層された状態の、yz断面を示す。y方向に1周期ないし数周期の幅AA'を除く両面にフォトリソ12をリソグラフィにより設け、ストリップ状の開口AA'からドライエッチングによりSiO₂を一部除去する。これを点線で示す。そこへSiをスパッタリングにより埋め戻し、ほぼ原表面に復した後、レジストをリフトオフ法により除去する。この操作によって表面凹凸の周期構造を保ち、その上に実施例1に従ってz方向に多数回成膜を続ける。なお上記のプロセスにおいて、断面のy方向周期性を甚しく損なわない範囲で、SiO₂のドライエッチング操作を省略すること、またはSiによる埋め戻し操作を省略することも可能である。

【0026】

この作製法により光を波長選択性共振、分岐、結合、反射させることができる。これらの回路では放射が抑圧されている、ないし放射が生ずる方向が限定されているため放射損失が減少し、従来の光回路では過大な放射損失のため実現出来なかった構成が可能になっている。即ち、図11の例で云うと、考えている回路素子から強く放射の生じ得る方向を斜線部がおおっていれば放射損失を防止できる。上面からの透視図でそれぞれの回路を以下表す。

【0027】

図17においては、入射導波路Aからの光波はB、Cに分岐される。

図18には三様の共振器を例示している。共振器B上に光波が定在波を形成する条件をみたす波長の近傍においてAからの光波はCに透過し、それ以外では波は反射される。共振器Eは導波路Dとのみ結合する。共振条件外ではDから入った波は内部損失の分を除けば全部反射される。共振条件下では内部蓄積エネルギー、損失（材料損失と残留放射損失）ともに増加するので反射係数は低下する。リング状の共振器G上で光の波長が丁度定在波条件をみたす時FからHへの透過が生ずる。

【0028】

図19では、導波路ABとCDが局部的に近接し、その部分で両者の横方向に指数的に減少する波が重なり合い、二つの導波路の間のパワーのやりとり、即ち結合を生ずる。

図20では、A、Bの間に幅の狭くなった部分をおき波を部分反射させる回路、C、Dの間に短い側路をおき波を部分反射させる回路を示している。

また、屈折率の異なる部分を形成するためには図16と同じくリソグラフィによってマスクを形成した後、イオン注入法を利用することができ、従って導波路、共振器、分岐器、結合器、反射器などを形成することができる。

【0029】

放射の抑圧された構造(PBS, Photonic Bandgap Structure)において光回路の接続が飛躍的に自由になる効果を図21を参照しつつ例示・説明する。導波路INにより左方から入射した光は分岐器BRにより上下に別れた路をとる。下方の枝を通る光は共振器R2を経て透過、またはR2で反射する。透過する波は結合器

Cへ向かう。上方の枝を通る成分は同様に振る舞い、透過する成分は結合器Cへ向かって、並行する導波路に結合する。合波された信号波はR E Fで示す反射器で一部は反射され、一部は出力端O U Tに向かう。

【0030】

このような操作を通常の光集積回路で行なうことは、過大な放射損失のため実際は不可能であるが、P B Sの中では電気回路を接続するのと同様に実行することができ、光回路の設計の自由度が飛躍的に増大する。

【0031】

〔実施例4〕

本発明において、3次元周期構造を形成する過程において生ずる表面2次元凹凸周期構造の、凹み部または凸起部に選択的に機能物質を導入する方法を以下説明する。積層においても、エッチングにおいても、山部、谷部それぞれをより多く積層ないしエッチする効果がそれぞれ存在することを示そう。図22には凹凸のある基板に原料物質の粒子が入射する様子を示す。基板に到来し、付着しないで反跳する粒子が基板に再到着・付着する効果は凹部において多い。即ち、原料物質の粒子が反跳する現象は凹部に選択的に堆積する効果をもつ。また、付着した粒子は熱エネルギーにより基板表面を動き回ることができる。これはマイグレーションと呼ばれる。マイグレーションにおいては、平均的に温度の高い部分から低い部分へ、吹き寄せられるように粒子の移動が生ずる。基板上では通常凹部が凸部より温度が高く、凹部から凸部への移動が生ずる。スパッタエッチングにおいても同様に凹部が多くエッチされる機構、逆に凸部がより多くエッチされる機構が存在する。

【0032】

気体イオンによるスパッタエッチングにおいても反跳イオンは存在し、反跳イオンは凸部より凹部をより多く侵食する。一方、以前に図8で説明した通り、水平面より傾斜部はより深くエッチされるので、もし表面が図23の形をしていれば谷部がより深く、表面が図24の形をしていれば山部がより深くエッチされる。

【0033】

以上を要約すると、成膜条件、スパッタエッチ条件、表面粒子の移動しやすさ、表面形状など諸条件の適切な選択によって堆積においては山部を厚くも谷部を厚くも成膜でき、エッチングについては山部を深くも谷部を深くも除去できる。

【0034】

本発明において、パターン形成法が少なくとももう一つある。機能性ゲスト材料を山または谷の平坦部に堆積し傾斜部に堆積しないようにすることもできる。即ち、凹凸表面にゲスト材料をほぼ一様な厚さに堆積し、引き続きスパッタエッチすることにより、平坦部をより浅く、傾斜部をより深くエッチすることによりゲスト材料を傾斜部には残さず平坦部であるところの山頂と谷底とに残すことができる。

【0035】

図25は3次元の金属・絶縁物・金属トンネル接合とその作成法を説明するためのものである。実施例1のように、基板8（熔融石英）上に凹凸パターンを形成し、その凹部に金属15の領域を形成する。酸素を一時導入して15の表面を酸化し、さらに凸部に金属16の領域を形成する。但しA1は絶縁膜（アルミナ）を作るためにのみ用いて、金属A、BともにPt, W, Tiなどとすることも可能である。その上にSiO₂の凹凸パターンを形成し、以下繰り返すことにより、金属・絶縁物・金属トンネル接合の高密度3次元列を形成することができ、マイクロ波（ミリ波、サブミリ波を含む）の検出器として小型で高効率なデバイスを実現することが出来る。なお図25において、xy面上のパターンをy方向に引き伸ばされた線状またはすだれ状のパターンとして2次元化することが出来るのは云うまでもない。

【0036】

なおMIMのトンネル接合としては各横方向周期に対応して接合を作る（図26）の他に図27のように積層化させる方法や図28, 29のような島状膜を用いてトンネル電流を流すこともできる。但し、図26や図27では金属膜が厚い場合、積層（z）方向で光が透過しないのでPBSとの組み合わせの仕方が制限される。例えば図30, 31, 32の形で用いる方法、あるいは積層させて、面に沿う方向に光を伝搬させる方式が可能である。膜厚の薄い場合はこの種の制限

がない。なお、MIMの利用法としては非線形のI-V特性を利用した、スイッチや検波・混合などへの応用と注入による発光を利用するもの（プラズモン発光）が可能である。非線形I-V特性等の電気特性によるスイッチング等の電子機能を用いるときは不透明のホスト材料を用いてもよい。

【0037】

【実施例5】

2種類以上の材料から構成される3次元周期構造体において、構成材料をSiCやSiなどの導電性材料とすることができる。その構造においてヘテロ接合受光器を形成するなど、電子素子とフォトリック・バンドギャップ(PBG)効果を利用した光学素子を融合させた性質を持つデバイスを作製することができる。

【0038】

以下、より詳しく説明する。その準備として、機能材料(Fとする)又は機能単位(Functional Unit (FUとする))をPBG構造(PBS)に導入する方法を3つに分類する。

(イ) FUをPBS構造に囲まれる形(領域)に導入する方法(図30、31、32)

(ロ) PBSを構成する周期的に用いる物質(SiO₂やa-Si)の一部にFを挿入して用いる方法(図33)

(ハ) PBSを構成する周期的に用いる物質(SiO₂やSiなど)の一方を機能物質で構成する方法(図33)

【0039】

上のいずれの形で用いるかによって半導体や金属の構造などの構成が変わる。以下に示す例では(イ)(ロ)(ハ)の諸例が示されている。この場合、PBSを構成する2つの物質A、Bの構成法には下記の如く少なくとも4通りのものが考えられる。

【0040】

【表1】

	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4
--	------	------	------	------

物質A	半導体A	2種の半導体	半導体A	A ₁ , A ₂ の複合膜
		A ₁ , A ₂ の複合膜		
物質B	半導体B	半導体B	絶縁膜と半導体	絶縁膜
			Bの複合膜	

【0041】

PBSを構成する材料をSiやSiCなどのようにすべて半導体にすると屈折率の差が小さくなるため、すべての方向に遮断帯またはある波長域における遮断特性を保つことは困難になるが、主軸方向に沿ってはバンドギャップが維持される。この種の構造では積層方向に伝導性が得られるので、様々な新しい機能が達成できる。例えばp形、n形になるように各々の層を適当にドーピングすることにより、多重又は一对のpn構造が得られるので、整流性が得られ、逆バイアスを加えた状態ではpin検出器として利用でき、順バイアスされた接合では発光素子として利用できる。なお、PBSを構成する半導体A、Bにおいて一方又は双方を超薄膜の多層構造で構成すると、量子井戸や2重障壁構造などを作り込むことができる（タイプ2）。この場合、①共鳴トンネル効果に伴う負性抵抗特性や、②順方向にバイアスされた量子井戸では2次元電子・正孔の注入に伴う発光吸収・屈折率の変調効果、さらに③逆バイアスされた量子井戸に見られるシュタルク効果（電界に伴って吸収率や屈折率の変化する効果）が現れる。

【0042】

さらに（タイプ3や4のように）、絶縁膜を使用した構造では積層方向に電流を流すのは困難となるが、量子井戸薄膜の効果や絶縁膜中に分散したシリコン超微粒子などの持つ注入発光などの光学的特性があらわれる。

【0043】

〔実施例6〕

本実施例では、光学的分極率が非線形性をもつ物質、あるいは非線形物質を媒質中に3次元周期的に配列した構造およびその作成方法とその効果を述べる。前

記媒質は実施例2で説明した周期的な構造であっても良い。

【0044】

説明の順序として、従来の技術を略述する。Cu, Au, Agなどの微粒子は非線形分極率をもつので、ガラス基板上に微粒を形成して、その上にレーザ光を照射して高調波を発生させ得ることが知られている。この場合、高調波は、空間にランダムかつ平均的には一様に存在する微粒から発生するため基本波レーザ光と一定の位相関係をもたせることができない。

【0045】

実施例1で説明した通り石英基板上に周期的凹凸を形成し、その上にスパッタエッチングを少なくとも一部分に含みつつSiO₂膜を堆積する。その上にCu, Au, Agなどの膜を堆積し、熱処理を行うと堆積時の跳ねかえり（反跳）により凸部より凹部により多く積層される。ただし成膜時の温度やイオン衝撃エネルギーによる粒子の表面移動の効果を利用して凸部により多く積層することもできる。これらの効果により2次元周期形状を呈する。

【0046】

(1) その上にSiO₂膜を形成して以下繰り返すことができる。この方法によれば均質なSiO₂媒質中に非線形分極率をもつ物質が3次元周期的に配列する。故に、前述の方法で高調波を発生させたとき、配列要素間に一定の位相差が生じ、その干渉の結果、空間の特定な方向に高調波を効率よく放射させることができる。(2) その上にSi膜を形成し（その上にCu、Au、Agなどの膜を形成してもよく、形成せず直ちにでもよく）、その上にSiO₂膜を形成し以下繰り返すことができる。この方法によれば、(1)の方法の効果に併せて、PBSの効果により高調波の放射の生ずる方向の数を一つにする、ないし(1)よりも制限することができるという効果がある。

【0047】

金属微粒子だけでなく、LiNbO₃, LiTaO₃, KNbO₃などのニオブ酸・タンタル酸系物質は非線形光学効果をもち、スパッタリング等により薄膜化が可能であるので、それを(1)ないし(2)の方法で3次元周期構造化して非線形特性を利用することができる。

【0048】

あるいは図34に断面を示すように、凹凸をもつ SiO_2 の上に LiNbO_3 （または LiTaO_3 、 KNbO_3 など）を薄くスパッタし、スパッタエッチングにより斜面部のみを除去して山部、谷部を残し、繰り返すことにより3次元周期構造を形成することもできる。

【0049】

〔実施例7〕

実施例6の(1)に書いたように、一様な第1のホスト透明体の中に第2の微小なゲスト透明体を3次元周期構造体として導入することができる。これは3次元の透過または反射回折格子として利用できる。ゲストは3次元的に分布するので、入射波からみたとき大きい回折断面積、即ち高い回折効率を得ることができる。

【0050】

〔実施例8〕

図35は発光・光増幅機能をもつ物質を含む3次元の周期構造体とその作成法を説明するためのものである。実施例1のように、石英基板上に凹凸パターンを形成し、その上に活性元素Erを含む SiO_2 の領域を形成する。その上にSiの領域を形成する。その上に SiO_2 の凹凸パターンを形成し、以下繰り返すことにより、発光・光増幅機能をもつ物質を含む3次元の周期構造体を形成することができる。

【0051】

この系は光励起により1.5 μm 帯の光を発生・増幅することが出来る。ブラッグ遮断の効果により、励起されたErイオンが自発発光によりエネルギーを失う率が激減するので、光発生・増幅の効率が高まるという効果がある。なお SiO_2 にY、Ndなどをドーピングすることができる。稀土類のほかに、CdSなど半導体の微結晶を実施例6のごとく成膜途中の2次元凹凸界面に導入することにより光発生・増幅を行なわせることが出来る。

【0052】

図36に示すように、物質14(SiO_2)の凹凸面の上にCdSやCdTe

などの微細結晶からなる超薄膜を形成し、スパッタエッチングにより斜面部のみを除去して山部、谷部を残し、そのうえに物質13 (Si) を堆積する。この過程を繰り返して、 SiO_2 とSiからなるPBSの中に微細なCdSやCdTeなどの結晶群を3次元周期的に形成することが出来る。CdSやCdTeなどを励起すると光を放射することができるが、PBSの中の放射が遮断される方向には自発再結合発光がないので励起状態分子の利用効率が高い。

【0053】

【実施例9】

本実施例では、電気光学効果をもつ物質を3次元周期構造内に配列した構造、その作成方法例と作用効果を述べる。

実施例1で説明した通り石英基板上に周期的凹凸を形成する。 SiO_2 、Siを順次（スパッタエッチを含みつつ）成膜する。Siはノンドープとする。ついで電極として SiO_2/Si の1周期ないし数周期、導電性をもたせつつ成膜する（なおSiにはn型（または n^+ ）、ないしp型（または p^+ ）を用いる）。これらにより導電性を持つ層をPBS特性を保持したまま形成できる。

【0054】

PBS内部に液晶物質を導入し、ここで述べた電極により電圧を与えれば、液晶の配向を制御することが出来、複屈折や屈折率を制御することが出来、可変波長共振器を形成出来る。

【0055】

【実施例10】

半導体レーザなどの発光素子を3次元周期構造体中に作り込むことにより、発光素子が本来持っている自然放出光の放射を抑えることができ、これによってしきい値電流を極めて小さくすることができる。

【0056】

図37には、面発光レーザあるいはマイクロキャビティレーザ(Microcavity Laser)を3次元PBS内に作製した構造をしめす。当該レーザから出力導波路への結合を除いて、他の方向への自発再結合発光は著しく抑圧されるので、レーザ動作しきい値が減少し有利である。

【0057】

また図38には3次元PBSとレーザを一体集積する方法および当該構造を示す。化合物半導体基板（例えばInPまたはGaAs）上に2次元凹凸を形成し、その上に実施例1、2の方法でSiO₂/a-Si等の3次元PBSを形成し、ドライエッチングにより基板上にとどく孔を形成する。その面の上にエピタキシャル成長により半導体レーザを作る。この構造では横方向への不要放射が禁止、または抑制されるのでレーザ動作しきい値が低下して有利である。図37および38において、電極とリードは別に設けてもよく、あるいはPBS中のSiにドーピングして電気伝導性をもたせ、電極とリードの役目をさせることも出来る。

【0058】

[実施例11]

また、PBSのプログラマブルレーザへの次の応用が可能である。別項（実施例2および図11）で述べたように、特定モードしか許されないPBS構造の内部に電氣的な励起できるpn接合や光学的に励起のできる色素などを設けた複合素子では、許されたモードに関与した発光過程のみが許され、他の自然光が特定方向に沿ってのみ放射される。こうしたPBSにおいてはその構成要素に電気光学効果のある材料を用いるとフィルター特性が外部電圧によって制御できるので、発光素子のスペクトルや発光方向を電氣的にプログラムできる。

【0059】

[実施例12]

フォトダイオードなどの受光素子を導波路で外部と結合された、PBS特性をもつ3次元周期構造体中に作り込むことにより、受光器への外部からの放射即ち雑音入力を抑えることができ、これによって入力雑音の低下と受光感度の向上を図ることができる。また放射立体角の消失または減小に基き零点ゆらぎの自由度が消失または減小し、雑音がいっそう減小する。

【0060】

さらに、プログラマブル受光素子を実現することが次のようにしてできる。完全なPBS構造の内部に特定の波長域にだけ感度を持つようなpn接合や光伝導形の受光素子を組み込むと外部からの信号光も背景光も感光部に到達しない状態

となる。この状態からわずかにずれたPBSを用いると、特定の波長の光のみが特定の方向から光検出部に到来する。従ってこの複合素子は入射光の波長と方向（波数）に強い選択性のある複合素子に用いられる、PBSにおいてその構成要素に電気光学効果のある材料を用いるなどフィルター特性が外部電圧の印加によって変化できるので、受光素子の応答特性を電氣的にプログラムすることができる。

【0061】

【実施例13】

図39に示すように基板上の直交するx軸、y軸を対称軸とした2次元的に周期的な凹凸をもつ基板の上に、共通の周期的凹凸をもつ2種類以上の透明物質を周期的に積層すれば、遮断周波数領域を除く一般の波長域で、その立体構造は実効的光学誘電テンソル

【0062】

【数7】

$$\overleftrightarrow{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

をもつ2軸異方性の人工媒質として機能する。適切な設計によれば、天然物質と異なりある範囲の媒質定数を連続的に実現できる、また遮断域近傍で現れる強い分散性のため極めて大きい異方性可以实现できるという性質がある。

【0063】

【発明の効果】

以上のように、請求項2の方法によれば、スパッタエッチングを単独で、または成膜と同時に用いる技術の形状整形効果を活かして、極めて微細な、3次元的に周期的な構造体を工業的に作製することが出来るので、フォトニックバンドギャップ効果を実現できる。

【0064】

請求項3によれば、前項の技術を更に発展させ、3次元周期構造の内部に光学的分極率が非線形性をもつ物質、または電気光学材料、または透明体、または導電性物質などを周期的に設けることが出来、多種多様な電子機能、光機能が可能となる。

【0065】

請求項4によれば、3次元周期構造の内部に発光性あるいは光増幅性物質を周期的に設けることが出来、高効率な光能動素子が可能となる。

【0066】

請求項5によれば、周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質をほぼ周期的に順次積層した構造をもつ3次元的にほぼ周期的な構造体、即ち光波長のある範囲で遮断特性をもつ人工媒体のなかに、導波路あるいは共振器あるいは分岐器あるいは結合器あるいは反射器、または受光器等の機能部品を集積することが出来、無放射特性の利点を活用することが出来る。

【0067】

請求項6によれば、3次元周期構造の内部に半導体レーザを設けることができ、自然放出光損失のない高効率のレーザ作用が実現できる。

【0068】

請求項7によれば、基板の上の直交するx軸、y軸を対称軸とした2次元的に周期的な凹凸をもつ基板の上に共通の周期的な凹凸をもつ2種類以上の膜状透明物質を周期的に順次積層した構造を実現できるので、任意の値の対角形誘電率テンソルで表される光学的2軸異方性を実現することが出来る。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図2】

本発明を使用しない3次元周期構造の作製方法を示す説明図。

【図3】

本発明を使用しない3次元周期構造の作製方法を示す説明図。

【図 4】

スパッタリング法を示す説明図。

【図 5】

真空蒸着法を示す説明図。

【図 6】

レーザアブレーション法を示す説明図。

【図 7】

角度依存性のあるエッチング法を示す説明図。

【図 8】

エッチング率の角度依存性を示す説明図。

【図 9】

3 次元周期構造の特性を説明するための図。

【図 1 0】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 1】

x y 面内に六方対称, z 方向に周期的な構造のブリュアン域を示す説明図。

【図 1 2】

本発明のひとつの実施例を示す説明図であり、点線の円は実線で示すべき円孔が本来の位置に存在しないことをあらわす。

【図 1 3】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 4】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 5】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 6】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図 1 7】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図18】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図19】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図20】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図21】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図22】

本発明のひとつの実施例で使用する選択的積層を示す説明図であり、Tは山、Vは谷である。

【図23】

本発明のひとつの実施例で使用する選択的エッチングを示す説明図であり、実線の輪郭が破線状に変化する。

【図24】

本発明のひとつの実施例で使用する選択的エッチングを示す説明図であり、実線の輪郭が破線状に変化する。

【図25】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図26】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図27】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図28】

本発明のひとつの実施例を示す説明図であり、だ円は島状薄膜金属を表し、曲面上に点在する。

【図29】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図30】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図31】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図32】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図33】

本発明のひとつの実施例を示す説明図であり、A、B（即ち1、2）の界面に機能物質Fを挿入する方法が（ロ）、AまたはBをFで構成する方法が（ハ）である。 【図34】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図35】

本発明のひとつの実施例の作製法を示す説明図。

【図36】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図37】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図38】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

【図39】

本発明のひとつの実施例を示す説明図。

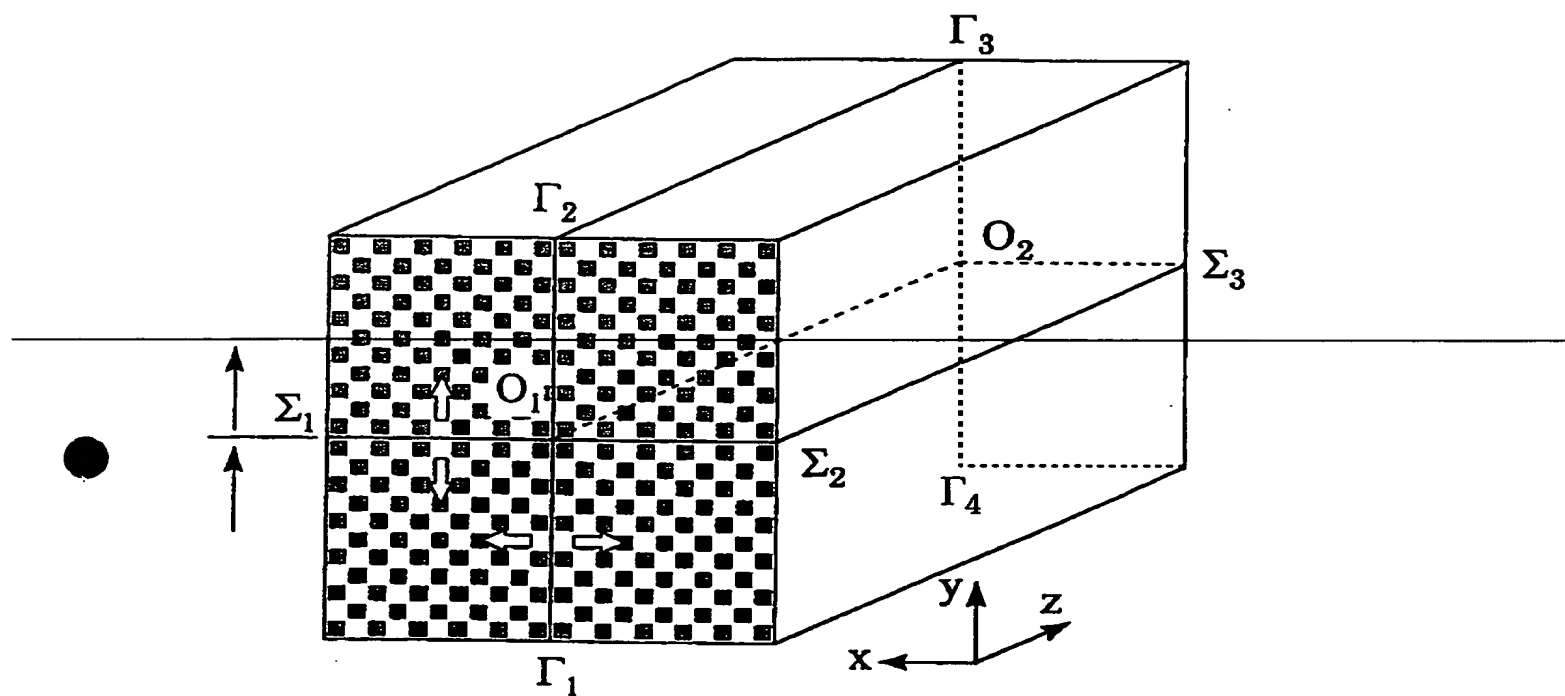
【符号の説明】

- 1 物質A（例えば SiO_2 ）
- 2 物質B（例えばSi）
- 3 GaAs
- 4 AlGaAs
- 5 屈折率 n_1 の物質
- 6 屈折率 n_2 の物質
- 7 ターゲット
- 8 基板

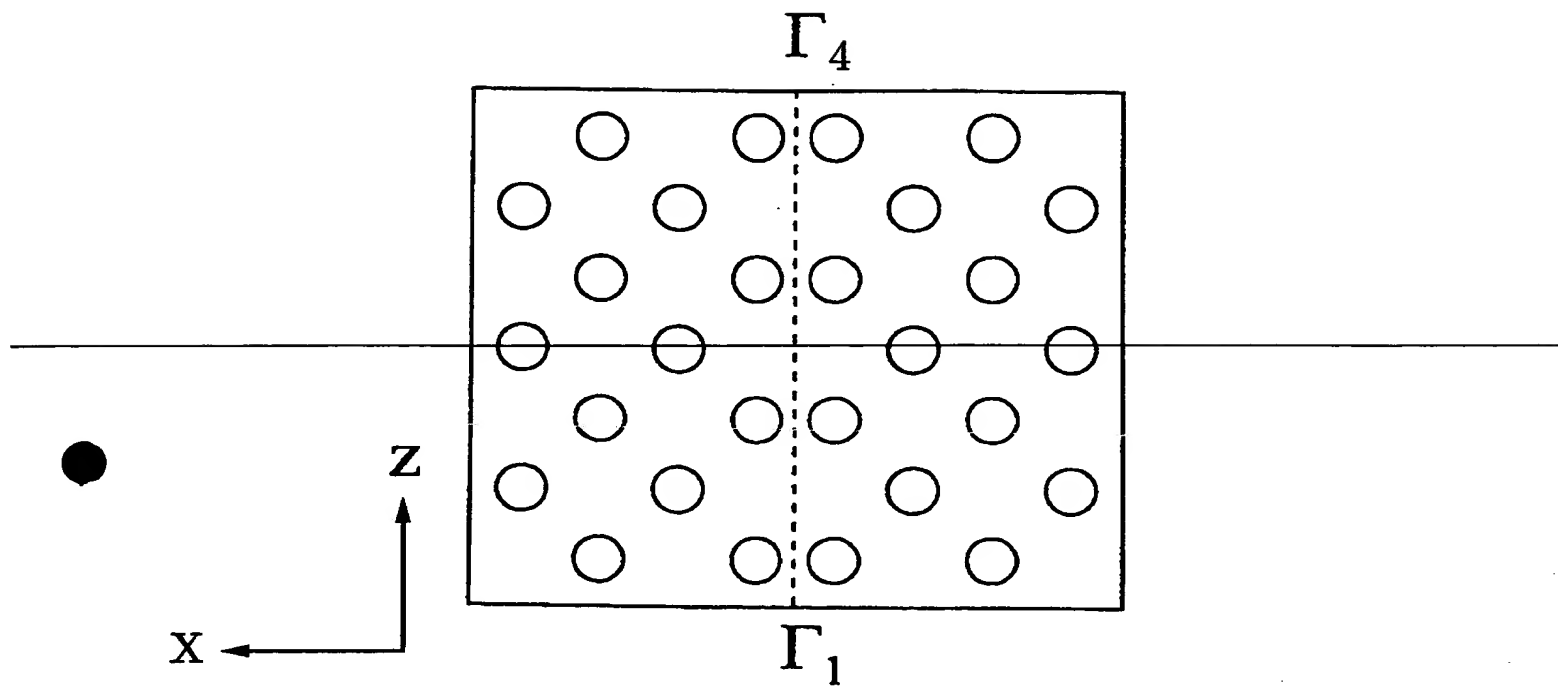
- 9 蒸着源
- 10 レーザ
- 11 原料物質
- 12 レジスト
- 13 Si
- 14 SiO₂
- 15 金属A (例えばAlなど)

- 16 金属B (例えばPtNiWTiなど)
- 17 LiNbO₃
- 18 ErドープSiO₂
- 19 機能単位
- 20 3次元フォトリソニックバンドギャップ構造
- 21 活性領域
- 22 出力導波路
- 23 IIIIV族基板
- 24 エピタキシャル層

【図14】

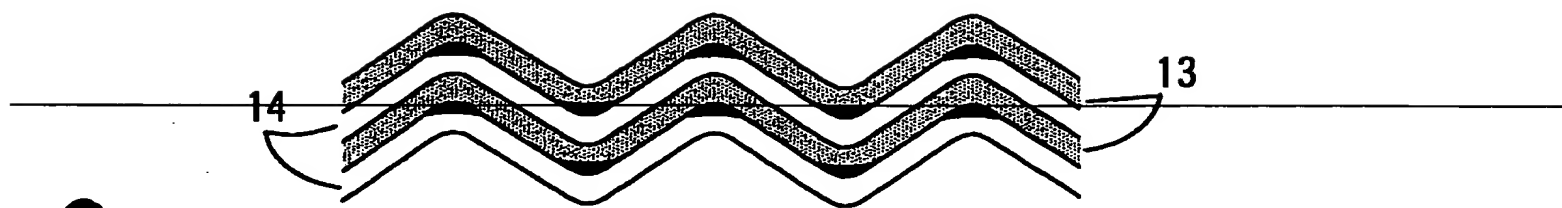


【図15】

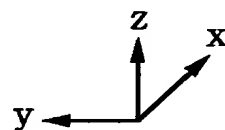
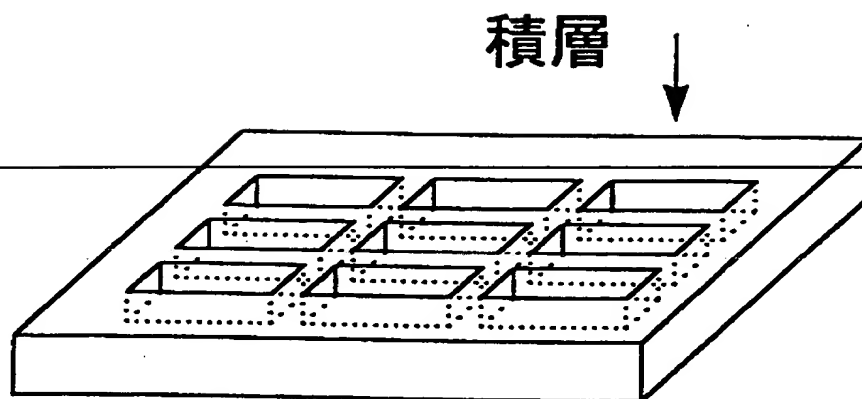


特平 9-114951

【図36】



【図39】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 周期が1 mm程度ないしそれ以下の3次元周期構造を提供する。

【解決手段】 2次元的にほぼ周期的な凹凸を持つ2種類以上の膜状物質をほぼ周期的に順次に積層した構造を持つ、3次元的にほぼ周期的な構造体から成る。

一例として、屈折率の異なる材料1と材料2から構成される。

簡単な製造方法により、周期が1 mm程度ないしそれ以下の3次元周期構造体
が得られる。この構造によって、着目する波長に対して、基板の面内の複数の軸
方向および積層の方向を含む多くの立体角方向への伝搬を遮断させることができ
る。

【選択図】 図1

【書類名】 職権訂正データ
【訂正書類】 手続補正書

<認定情報・付加情報>

【補正をする者】
【識別番号】 391006566
【住所又は居所】 宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋マンションファラオC-09
【氏名又は名称】 川上 彰二郎

【代理人】 申請人
【識別番号】 100088096
【住所又は居所】 東京都千代田区九段南4-5-11 富士ビル2階
【氏名又は名称】 福森 久夫

特平 9 - 1 1 4 9 5 1

【書類名】 手続補正書
【整理番号】 3D-PBS
【提出日】 平成 9年 7月15日
【あて先】 特許庁長官 殿
【事件の表示】
【出願番号】 平成 9年特許願第114951号
【補正をする者】

【事件との関係】 特許出願人
【識別番号】 391006566
【氏名又は名称】 川上 彰二郎
【代理人】
【識別番号】 100088096
【弁理士】
【氏名又は名称】 福森 久夫
【電話番号】 03-3261-0690

【手続補正 1】
【補正対象書類名】 明細書
【補正対象項目名】 0 0 1 3
【補正方法】 変更
【補正の内容】 1

【手数料補正】
【補正対象書類名】 手続補正書
【予納台帳番号】 007467
【納付金額】 2,700円
【ブルーフの要否】 要

【0013】

【数3】

$$\frac{\lambda_0}{4} = n_1 d_1 (= n_2 d_2)$$

であり、

【数4】

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{4}{\pi \lambda_0} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \right)$$

特平 9-114951

【書類名】 職権訂正データ
【訂正書類】 手続補正書

<認定情報・付加情報>

【手数料の表示】
【納付金額】 0円
【補正をする者】
【識別番号】 391006566
【住所又は居所】 宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋マンシ

ヨンファラオC-09

【氏名又は名称】 川上 彰二郎
【代理人】 申請人
【識別番号】 100088096
【住所又は居所】 東京都千代田区九段南4-5-11 富士ビル2階
【氏名又は名称】 福森 久夫

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [391006566]

1. 変更年月日 1990年12月27日

[変更理由] 新規登録

住 所 宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋マンションファラ
オC-09

氏 名 川上 彰二郎

THIS PAGE BLANK (USPTO)